



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN

PROYECTO FIN DE GRADO

TÍTULO: Diseño acústico y electroacústico de Waipahu Transit Center
en Honolulu, Hawái

AUTOR: Christian Sierra Carballo

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería de Sonido e Imagen

TUTOR (o Director en su caso): José Luis Sánchez Bote

DEPARTAMENTO: DIAC

VºBº

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE: Juana María Gutiérrez Arriola

VOCAL: José Luis Sánchez Bote

SECRETARIO: Juan José Gómez Alfageme

Fecha de lectura:

Calificación:

El Secretario,

Agradecimientos

En primer lugar agradecerle a mi tutor, José Luis Sánchez Bote, por el tiempo y la dedicación a este proyecto, así como la ayuda que me ha proporcionado.

A Paloma Martínez, por darme la oportunidad de trabajar en Alcatel-Lucent y trabajar en este proyecto.

A toda la gente de Kulturales que me ha acompañado a lo largo de la carrera, por haber compartido tantas horas de sufrimiento, aunque también de risas y buenos tiempos: Edu y Javi, por esas tardes en Kultu, programando o perdiendo el tiempo; Abdón y Diego, por ser telecos y no saber configurar un switch; Chispa, Elenita, Dani y Almu, por demostrar que la universidad no es sólo estudiar.

A la gente de Getafe, por todos estos años: Miguel y Guillermo, por esas tardes de cervezas; a Mario y Jose, por esas tardes de rol.

A mis tíos Ángel y Bea, por el apoyo e interés durante estos años, gracias por haberme incentivado tanto a la lectura.

A mis padres, porque sin ellos jamás podría haber llegado tan lejos, por haberme dado la oportunidad de sacarme un carrera, aun con el sacrificio que significaba. Está dedicado a vosotros.

A mi hermana, la segunda ingeniera de la familia, y no por ello menos importante. Espero que termines la carrera pronto.

Y a Elena, por su apoyo cuando más lo he necesitado, por hacer que me saque la carrera por segunda vez, por su sonrisa y sus tonterías, y sobre todo, por haber aparecido en mi vida.

Resumen

El objetivo de este Proyecto Fin de Grado es el diseño de megafonía y PAGA (Public Address /General Alarm) de la estación de tren Waipahu Transit Center en la ciudad de Honolulu, Hawái. Esta estación forma parte de una nueva línea de tren que está en proceso de construcción actualmente llamada Honolulu Rail Transit. Inicialmente la línea de tren constará de 21 estaciones, en las que prácticamente todas están diseñadas como pasos elevados usando como referencia las autopistas que cruzan la isla. Se tiene prevista su fecha de finalización en el año 2019, aunque las primeras estaciones se inaugurarán en 2017.

Se trata en primer lugar un estudio acústico del recinto a sonorizar, eligiendo los equipos necesarios: conmutadores, altavoces, amplificadores, procesador, equipo de control y micrófonos. Este primer estudio sirve para obtener una aproximación de equipos necesarios, así como la posible situación de estos dentro de la estación.

Tras esto, se procede a la simulación de la estación mediante el programa de simulación acústica y electroacústica EASE 4.4. Para ello, se diseña la estación en un modelo 3D, en el que cada superficie se asocia a su material correspondiente. Para facilitar el diseño y el cómputo de las simulaciones se divide la estación en 3 partes por separado. Cada una corresponde a un nivel de la estación: Ground level, el nivel inferior que contiene la entrada; Concourse Level, pasillo que comunica los dos andenes; y Platform Level, en el que realizarán las paradas los trenes.

Una vez realizado el diseño se procede al posicionamiento de altavoces en los diferentes niveles de la estación. Debido al clima existente en la isla, el cual ronda los 20°C a lo largo de todo el año, no es necesaria la instalación de sistemas de aire acondicionado o calefacción, por lo que la estación no está totalmente cerrada. Esto supone un problema al realizar las simulaciones en EASE, ya que al tratarse de un recinto abierto se deberán hallar parámetros como el tiempo de reverberación o el volumen equivalente por otros medios.

Para ello, se utilizará el método Ray Tracing, mediante el cual se halla el tiempo de reverberación por la respuesta al impulso de la sala; y a continuación se calcula un volumen equivalente del recinto mediante la fórmula de Eyring.

Con estos datos, se puede proceder a calcular los parámetros necesarios: nivel de presión sonora directo, nivel de presión sonora total y STI (*Speech Transmission Index*). Para obtener este último será necesario ecualizar antes en cada uno de los niveles de la estación.

Una vez hechas las simulaciones, se comprueba que el nivel de presión sonora y los valores de inteligibilidad son acordes con los requisitos dados por el cliente.

Tras esto, se procede a realizar los bucles de altavoces y el cálculo de amplificadores necesarios.

Se estudia la situación de los micrófonos, que servirán para poder variar la potencia emitida por los altavoces dependiendo del nivel de ruido en la estación.

Una vez obtenidos todos los equipos necesarios en la estación, se hace el conexionado entre éstos, tanto de una forma simplificada en la que se pueden ver los bucles de altavoces en cada nivel de la estación, como de una forma más detallada en la que se muestran las conexiones entre cada equipo del rack.

Finalmente, se realiza el etiquetado de los equipos y un presupuesto estimado con los costes del diseño del sistema PAGA.

Abstract

The aim of this Final Degree Project is the design of the PAGA (Public Address / General Alarm) system in the train station Waipahu Transit Center in the city of Honolulu, Hawaii. This station is part of a new rail line that is currently under construction, called Honolulu Rail Transit. Initially, the rail line will have 21 stations, in which almost all are designed elevated using the highways that cross the island as reference.

At first, it is treated an acoustic study in the areas to cover, choosing the equipment needed: switches, loudspeakers, amplifiers, DPS, control station and microphones. This first study helps to obtain an approximation of the equipments needed, as well as their placement inside the station.

Thereafter, it is proceeded to do the simulation of the station through the acoustics and electroacoustics simulation software EASE 4.4. In order to do that, it is made the 3D design of the station, in which each surface is associated with its material. In order to ease the design and calculation of the simulations, the station has been divided in 3 zones. Each one corresponds with one level of the station: Ground Level, the lower level that has the entrance; Concourse Level, a corridor that links the two platforms; and Platform Level, where the trains will stop.

Once the design is made, it is proceeded to place the speakers in the different levels of the station. Due to the weather in the island, which is about 20°C throughout the year, it is not necessary the installation of air conditioning or heating systems, so the station is not totally closed. This cause a problem when making the simulations in EASE, as the project is open, and it will be necessary to calculate parameters like the reverberation time or the equivalent volume by other methods.

In order to do that, it will be used the Ray Tracing method, by which the reverberation time is calculated by the impulse response; and then it is calculated the equivalent volume of the area with the Eyring equation.

With this information, it can be proceeded to calculate the parameters needed: direct sound pressure level, total sound pressure level and STI (Speech Transmission Index). In order to obtain the STI, it will be needed to equalize before in each of the station's levels.

Once the simulations are done, it is checked that the sound pressure level and the intelligibility values agree with the requirements given by the client.

After that, it is proceeded to perform the speaker's loops and the calculation of the amplifiers needed.

It is studied the placement of the microphones, which will help to vary the power emitted by the speakers depending on the background noise level in the station.

Once obtained all the necessary equipment in the station, it is done the connection diagram, both a simplified diagram in which there can be seen the speaker's loops in each level of the station, or a more detailed diagram in which it is shown the wiring between each equipment of the rack.

At last, it is done the labeling of the equipments and an estimated budget with the expenses for the PAGA design.

Índice

Índice	7
Glosario, acrónimos y abreviaturas	11
1. Introducción.....	13
2. Honolulu Rail Transit Project	15
2.1. Archipiélago de Hawái y ciudad de Honolulu	15
2.2. Antecedentes en la construcción de una línea ferroviaria	17
2.3. Proyecto actual	18
3. Waipahu Transit Center	23
3.1.1. Ground Level.....	25
3.1.2. Concourse Level	27
3.1.3. Platform Level	28
4. Objetivos y requisitos técnicos	31
4.1. Calidad de la señal	31
4.1.1. Nivel de señal.....	31
4.1.2. Inteligibilidad	32
4.2. Protección de equipos	33
4.3. Buy American Act.....	33
4.4. Redundancia	33
4.5. Protección contra fallos	34
5. Sistema PAGA (Public Address & General Alarm)	35
5.1. Arquitectura del sistema	35
5.2. Equipos	36
5.2.1. Alcatel-Lucent OnmiSwitch 6850E.....	36
5.2.2. Advantech ARK-3360F	37
5.2.3. BSS Audio Soundweb London Blu-100.....	37
5.2.4. Crown DCi Network 4N/300	38
5.2.5. Crown CT16S.....	39
5.2.6. OBO Betterman B9/T	40
5.2.7. Penta TBMS™ con micrófono Shure 527B	40
5.2.8. Crown PZM®-11LLWR.....	41

5.2.9.	Penton RCS5T	43
5.2.10.	Atlas Sound APC-30T	43
5.2.11.	Atlas Sound APT-34T	44
6.	Nivel de ruido	47
7.	Simulación acústica y electroacústica en EASE 4.4	51
7.1.	Materiales	51
7.2.	Modelado 3D.....	53
7.2.1.	Ground Level	58
7.2.2.	Concourse Level	60
7.2.3.	Platform Level	62
7.3.	Tiempo de reverberación y volumen equivalente	64
7.4.	SPL directo.....	69
7.4.1.	Ground Level	70
7.4.2.	Concourse Level	71
7.4.3.	Platform Level	72
7.5.	SPL total	73
7.5.1.	Ground Level	75
7.5.2.	Concourse Level	77
7.5.3.	Platform Level	78
7.6.	Ecualización.....	79
7.7.	STI (Speech Transmission Index).....	83
7.7.1.	Ground level.....	84
7.7.2.	Concourse level.....	86
7.7.3.	Platform level.....	87
8.	Conclusiones de las simulaciones	89
9.	Cálculo de amplificadores	93
10.	Ubicación de micrófonos	97
10.1.	Concourse Level	97
10.2.	Platform Level	98
11.	Conexionado del sistema PAGA	101
12.	Etiquetado de los equipos	107
13.	Presupuesto	111
14.	Conclusiones	115
15.	Referencias.....	117

16.	Bibliografía	119
17.	Anexo I Tablas de Cálculos	
18.	Anexo II Simulaciones en EASE	
19.	Anexo III Datasheets	
20.	Anexo IV Diagramas y conexionado	

Glosario, acrónimos y abreviaturas

AI	: <i>Articulation Index</i> ; índice de articulación.
ANS	: <i>Ambient Noise Sensor</i> ; micrófono de ruido ambiente.
AURA	: Módulo de EASE para realizar cálculos de acústica de salas más complejos y precisos.
dB	: Decibelio, 1/10 de un belio, unidad que mide la relación logarítmica entre dos magnitudes.
dba	: Decibelio ponderado A.
CIS	: <i>Common Intelligibility Scale</i> ; escala común de inteligibilidad.
EASE	: <i>Enhanced Acoustic Simulator for Engineers</i> ; programa de simulación acústica y electroacústica.
FACP	: <i>Fire Alarm Control System</i> ; sistema de alarma contra incendios.
HART	: <i>Honolulu Authority for Rapid Transportation</i> ; autoridad semi-autónoma de transporte público encargada de la construcción de la línea de tren.
Hz	: Hercio, unidad de medida de frecuencia.
IEC	: <i>International Electrotechnical Commission</i> ; organización de normalización en los campos eléctrico, electrónico y tecnologías relacionadas.
NFPA	: <i>National Fire Protection Association</i> ; Código Nacional de Alarmas de Incendio.
PA/GA	: <i>Public Address/General Alarm</i> ; sistema de megafonía y alarma.
SCU	: <i>Station Control Unit</i> ; ordenador central que controlará el sistema de alarma de la estación.
SNR	: <i>Signal to Noise Ratio</i> ; relación señal a ruido, se mide en decibelios.
SPL	: <i>Sound Pressure Level</i> ; nivel de presión Sonora, se mide en decibelios.
STI	: <i>Speech Transmission Index</i> ; índice de transmisión del habla.
TCCR	: <i>Train Control and Communications Room</i> ; sala donde se situarán los equipos de telecomunicaciones dentro de la estación.
TP	: <i>Technical Provision</i> ; conjunto de requisitos técnicos dados por el cliente.
V	: Voltios, unidad de medida de voltaje.
W	: Vatios, unidad de medida de potencia.

1. Introducción

La isla de Oahu es la tercera más grande de las que se compone el archipiélago de Hawái. En ella se encuentra la capital del estado, Honolulu. Esta isla es famosa por sus paradisíacas playas donde poder practicar surf, la base naval de Pearl Harbor, los volcanes que atraen a millones de turistas al año y el tráfico que sufren sus habitantes a diario.

La ciudad de Honolulu tiene la mayor congestión de tráfico de todo Estados Unidos, por delante de Los Ángeles, que tiene fama por ello. Los habitantes de la isla pierden un promedio de 58 horas al año en atascos, siendo la mayor parte de este tiempo en hora punta. Esto es debido a dos razones fundamentales: en la isla viven aproximadamente 900 mil personas con más de 1 millón de vehículos registrados, y el sistema de autovías y carreteras se diseñó sin tener esto en cuenta, siendo Hawái el estado con menos kilómetros de carretera de todo Estados Unidos.

Debido a este creciente problema, el estado trató de aliviar el tráfico proponiendo las siguientes soluciones:

- Creación de carriles de preferencia para vehículos con más de un pasajero.
- Ensanchamiento y ampliación de las carreteras y autovías.
- Mejora del sistema de autobuses, ampliando el número de vehículos usados y creando en la zona central de las carreteras un carril únicamente para su tránsito.
- Creación de una línea ferroviaria en pasos a nivel aprovechando, al igual que en el caso anterior, la zona central de las carreteras.

La primera era una solución a corto plazo, ya que el principal problema era el sistema de transporte. La segunda supondría realizar obras en el sistema de carreteras, teniendo que cortar la circulación y creando un mayor problema de tráfico mientras durasen estas obras. Además, la mayoría de las carreteras discurrían por dentro de la ciudad, por lo que el espacio disponible estaba limitado. Este mismo inconveniente surgía con las dos últimas.

Desde hace más de 40 años se había tenido la intención de construir una línea de tren en Honolulu, pero nunca llegó a realizarse debido a las diferencias entre los partidos políticos de la ciudad. Finalmente, tras un referéndum realizado en el año 2008 con un 53% de votantes a favor, se confirmó la creación de una línea metropolitana de tren, llamada *Honolulu Rail Transit*.

El objetivo de este Proyecto Fin de Grado consiste en el diseño de megafonía y PAGA (Public Address General Alarm) de una estación de tren dentro de este proyecto, del que el autor es partícipe dentro de la empresa Alcatel-Lucent, la cual está diseñando todo el sistema de telecomunicaciones.

Inicialmente, la línea de tren constará de 21 estaciones, en las que prácticamente todas están diseñadas como pasos elevados usando como referencia las autopistas que cruzan la isla. Actualmente está en proceso de construcción y se tiene prevista su fecha de finalización para el año 2019.

Se trata en primer lugar un estudio acústico y electroacústico del recinto a sonorizar. Teniendo en cuenta los requisitos dados por el cliente, se seleccionan los equipos necesarios: conmutadores, altavoces, amplificadores, procesador, equipo de control y micrófonos.

No se han proporcionado niveles de ruido de fondo en la estación, por lo que se hará una estimación mediante resultados de otro proyecto. Este cálculo será necesario a la hora de obtener los niveles de inteligibilidad de la estación.

Tras esto, se procederá a la simulación de la estación mediante el programa de simulación acústica y electroacústica EASE 4.4. Para ello, se diseñará la estación en tres proyectos diferentes, uno para cada nivel de la estación, a fin de facilitar el cómputo y cálculo de los resultados.

Una vez realizado el diseño, se procederá con la colocación de altavoces. Se realizarán las mediciones y los cambios necesarios para obtener una calidad de señal acorde con la normativa. Como resultados finales se obtendrán nivel de presión sonora directo, nivel de presión sonora total y STI, y se comprobará que cumple con los requisitos dados.

Para mejorar el sistema de refuerzo sonoro, se estudiará la situación óptima de los micrófonos en la estación. Éstos afectarán directamente a la potencia emitida por los altavoces, otorgando mayor o menor nivel de presión sonora dependiendo del nivel de ruido en la estación.

A continuación se diseñarán los bucles de altavoces para cada nivel de la estación y se realizará el cálculo de amplificadores con la cantidad de altavoces calculados anteriormente. Con estos resultados, se realizará el conexionado entre todos los equipos que componen el sistema PAGA, así como el etiquetado de éstos.

Finalmente, se calculará un presupuesto en base a los costes de los equipos y mano de obra del proyecto, sin tener en cuenta la instalación. De esta manera se podrá estimar un coste total del sistema PAGA diseñado, así como las horas necesarias para su realización.

2. Honolulu Rail Transit Project

La construcción de una línea de tren en la isla de Oahu era un tema pendiente para la ciudad desde tiempo atrás. Los abundantes problemas de tráfico que han sufrido los habitantes de Honolulu los últimos años han incentivado su construcción, como necesidad de encontrar una solución al transporte dentro de la isla.

Se espera que con la introducción de *Honolulu Rail Transit* el tráfico disminuya considerablemente. Tras la finalización de las obras e implantación de la línea de tren, se estima que el uso de este medio de transporte disminuya el tráfico en aproximadamente 30000 vehículos al año.

Estos datos aportan una nueva perspectiva en la isla, en la que el tráfico no sería un problema tan desmesurado como es hoy en día. Esto aportará más ventajas, como la reducción de la contaminación y la facilidad de desplazamiento en la zona sur de la isla, tanto para habitantes como para turistas.

2.1. Archipiélago de Hawái y ciudad de Honolulu

Hawái o Hawai'i es un archipiélago compuesto por cientos de islas. Aunque la isla más grande es la de Hawai'i, la de mayor importancia es la tercera por tamaño, Oahu. Esta isla posee la mayor densidad de población, y en ella se encuentra la capital del estado, Honolulu. Esto es debido a que la mayor parte de las islas del archipiélago están formadas por volcanes aún activos, lo que supone un riesgo para la creación de grandes núcleos urbanos.

Hawái se encuentra en la zona central del océano Pacífico, entre América y Asia. Debido a esta localización, el archipiélago tiene una gran influencia asiática y norteamericana, siendo la mayor parte de la población procedente de Japón y Estados Unidos.

La historia de Hawái comienza en el siglo VIII con, lo que se supone, la llegada a las islas de habitantes polinesios. Estas suposiciones se basan en el gran parentesco tanto físico como lingüístico que existe entre los hawaianos y el pueblo polinesio. Se cree que el nombre de las islas proviene de la palabra polinesia *Hawaiki*, que significa "tierra natal".

Se implantó un sistema estratificado por castas, en el que cada isla o región estaba gobernada por un jefe o rey y durante los siguientes siglos los habitantes polinesios se extendieron por las diversas islas.

En el año 1778, el explorador británico James Hook mantuvo el primer contacto europeo con los hawaianos. En un principio, los hawaianos tomaron a la tripulación como dioses y les veneraron, pero a medida que pasó el tiempo se percataron de su mortalidad. Se desarrollaron varios conflictos entre la tripulación británica y los nativos que se saldaron con decenas de muertos, entre ellos el capitán Hook, y la tripulación huyó.

A pesar de este incidente, según pasaron los años llegaron más barcos a Hawái, tanto europeos como asiáticos. Gracias a su posición estratégica, Hawái servía como puerto y fuente de suministros a mitad de camino para los navegantes que cruzaban el océano Atlántico. Además, el archipiélago recibió numerosos exploradores y comerciantes de Europa que quisieron aprovechar su situación geográfica.

Pero al igual que sucedió con la llegada de los europeos a América, la mayor parte de la población nativa murió por el contacto con enfermedades y virus a los que no estaban inmunizados. A causa de esto, apenas un 10% de la población actual en Hawái es descendiente de nativos.

Como parte importante de la historia de Hawái, cabe destacar que en 1810, el rey Kamehameha consiguió unificar por primera vez todas las islas bajo un único gobernante. Desde este punto, se estableció la dinastía Kamehameha que duró hasta casi la proclamación de la República de Hawái (1894).

Hawái pasó a ser territorio de Estados Unidos en 1898, y finalmente en 1959 se incorporó como un estado, siendo el último de los 50 que componen Estados Unidos en incorporarse al país.



Figura 2.1: Isla de Oahu, Hawái (Google Maps)

La capital de Hawái es la ciudad y condado de Honolulu, situada en la zona sur de la isla de Oahu. Esta ciudad es la principal entrada al archipiélago, tanto por vía aérea como marítima. El aeropuerto de la isla, Wikiwiki Honolulu International Airport, es uno de los más transitados de todo Estados Unidos, ya que cada año la isla recibe más de 18 millones de pasajeros.

Gracias a su clima tropical, geografía, historia y cultura, Hawái es en la actualidad un gran destino turístico con millones de turistas al año. Esto ha hecho que Honolulu haya crecido desde ser un pequeño poblado a una gran ciudad con casi un millón de habitantes, comparable por sus rascacielos con otras de Estados Unidos como Chicago, Los Ángeles o Nueva York.

2.2. Antecedentes en la construcción de una línea ferroviaria

Desde hace más de 40 años, se había intentando 4 veces la construcción de una línea de tren en la isla de Oahu.

En 1966, el entonces alcalde Neal S. Blaisdell tuvo la primera idea de realizar una línea de tren en Honolulu para aliviar los problemas de tráfico. Tras las elecciones de 1968, el nuevo alcalde, Frank Fasi, continuó con la idea de su predecesor en 1977, empezando a estudiar el proyecto. Se llamó Honolulu Area Rapid Transit.

Después de las nuevas elecciones en 1980, el presidente Ronald Reagan cortó la financiación a este tipo de proyectos, por lo que se canceló en 1981. Frank Fasi volvió a ser reelegido en 1984 y comenzó con el proyecto nuevamente, pero en 1992 el Consejo de la Ciudad de Honolulu votó en contra de la subida de impuestos.

Frank Fasi dimitió en 1994, y tras dos elecciones más, en 2004 el nuevo alcalde, Mufi Hannmann, empezó el proyecto Honolulu High-Capacity Transit Corridor, el cuarto intento de construcción de una línea de tren en la isla.

Se estudiaron las distintas opciones disponibles, entre las que se barajaban las siguientes:

- Construcción de una línea subterránea.
- Diseño de una línea de tren a nivel de suelo.
- Realización de una línea elevada en pasos a nivel.

Tanto la línea subterránea como la de pasos a nivel tendrían unos costes muy elevados, aunque más la primera que la segunda. Se decidieron por esta última, ya que a nivel de suelo se podrían producir accidentes con otros vehículos.

Finalmente, en el año 2008 se convocó un referéndum en el que se preguntaba a la población de la isla si quería que se realizase la construcción de la línea. Un 53% de los votantes votó a favor de la creación de la línea de tren y un 47% en contra. La mayoría de los votantes en la zona central de Honolulu votaron a favor, ya que serían los más beneficiados, mientras que los que vivían en las afueras y en la zona este de Oahu votaron en contra.

Debido a problemas técnicos y políticos se retrasó el comienzo de las obras hasta el año 2010.

2.3. Proyecto actual

Honolulu Rail Transit Project consiste en aproximadamente 32 km de vías en pasos elevados y 21 estaciones, más la zona de mantenimiento y cocheras llamada MSF (*Maintenance and Storage Facility*).

La línea de tren estará situada en la zona sur de la isla de Oahu. Al no disponer de espacio para la realización de una línea de tren a nivel de suelo, se propuso la solución de realizarla en pasos a nivel. Para su construcción se aprovechará la red de carreteras que discurre paralela a la costa (Figura 2.2), utilizando el carril central para la colocación de los cimientos y pilares que la sostendrá.

Este diseño es sencillo a la vez que efectivo, ya que estas autopistas unen las zonas de mayor población y tránsito del sur de la isla. Además de hacer que ya esté diseñado el recorrido, facilita la comprensión del trayecto de la línea, evitando planos de tren o metro confusos como en la mayoría de las ciudades.

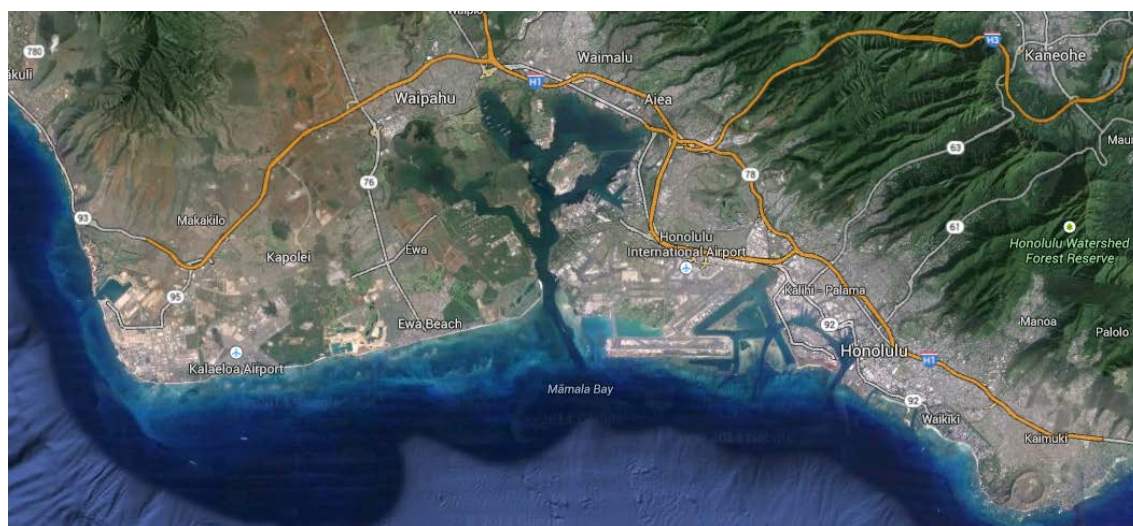


Figura 2.2: Línea de Honolulu Rail Transit

Los encargados de la construcción de la línea de tren es la autoridad semi-autónoma de transporte público *Honolulu Authority for Rapid Transportation* (HART). Es responsable de la planificación, construcción, funcionamiento, mantenimiento y expansión de toda la línea.

En cuanto al diseño y planificación de los subsistemas de telecomunicación en la línea, la encargada es la empresa Alcatel-Lucent.

Las estaciones no sólo se han situado en las autopistas que discurre por la isla por su facilidad de construcción, si no porque corresponden también con zonas de importancia del sur de la isla y en las que se espera una gran afluencia de viajeros.

Estas zonas son las siguientes:

- Kapolei, “área no incorporada” o barrio externo de Honolulu, al suroeste.
- El campus de West O’ahu de la Universidad de Hawaii, situado entre Kapolei y Waipahu.
- Waipahu, en la zona central, junto a *West Loch*, o Lago Oeste.
- Leeward Community College, otro campus de la Universidad de Hawaii.
- Aloha Stadium, estadio de fútbol americano de la ciudad.
- El puerto y la base naval de Pearl Harbor.
- El aeropuerto de Honolulu, Wikiwiki International Airport.
- Finalmente, en la zona sureste de la isla se encuentra la ciudad de Honolulu.

Las estaciones que componen la línea de tren y su tiempo de llegada hasta Ala Moana Center, la última estación de la línea, se encuentran en la Figura 2.3. Como se puede observar, el máximo recorrido es de 42 minutos, en el que se puede recorrer la zona sur de la isla de lado a lado.

PROJECTED RAIL TRAVEL TIMES TO ALA MOANA CENTER STATION 21			
STATION	TIME	STATION	TIME
1 East Kapolei	42 minutes	11 Honolulu International Airport	16 minutes
2 UH West Oahu	40 minutes	12 Lagoon Drive	14 minutes
3 Hoopili	36 minutes	13 Middle Street	12 minutes
4 West Loch	34 minutes	14 Kalihi	10 minutes
5 Waipahu Transit Center	31 minutes	15 Kapalama	8 minutes
6 Leeward Community College	29 minutes	16 Iwilei	6 minutes
7 Pearl Highlands	28 minutes	17 Chinatown	5 minutes
8 Pearlridge Center	24 minutes	18 Downtown	4 minutes
9 Aloha Stadium	21 minutes	19 Civic Center	3 minutes
10 Pearl Harbor Naval Base	19 minutes	20 Kakaako	2 minutes

Figura 2.3: Estaciones que componen la línea y tiempo de llegada hasta Ala Moana Center station

Claramente, este tiempo es muy inferior a lo que se tardaría mediante otro medio de transporte como autobús o coche en hora punta. Además, la alta frecuencia de trenes favorecerá la disminución de largas esperas que podrían aumentar este tiempo y, por ende, evitará también que se produzcan grandes aglomeraciones de viajeros.

El proyecto se ha dividido en 2 fases para agilizar la construcción de la línea de tren y poder abrirse al público cuanto antes. Éstas son:

- 1ª fase, construcción de las vías y estaciones desde East Kapolei hasta Aloha Stadium, así como la zona de mantenimiento y cocheras MSF (*Maintenance and Storage*)

Facility) y OCC (Operations Control Center). Se tiene programada su finalización para el año 2017.

- 2ª fase, construcción de las vías y estaciones desde Pearl Harbor hasta Ala Moana Center, en Honolulu. Se inaugurará dos años después de la fase 1, en el año 2019.

Aunque este primer trayecto consta de 21 estaciones, se tiene pensado como un comienzo. Ya se tiene planeada una futura ampliación de la línea que añadirá:

- 5 estaciones que conectarán Kapolei al oeste.
- Otras 5 estaciones que se unirán con el campus de Manoa de la Universidad de Hawaii y el barrio de Waikiki al este.
- Una segunda línea paralela al aeropuerto con 2 estaciones, que unirá el barrio de Salt Lake y evitará el recorrido más largo del aeropuerto.



Figura 2.4: Recorrido de la línea, estaciones y futuras ampliaciones

La empresa encargada de la construcción de los trenes es Ansaldo-Breda. Esta empresa italiana lleva 13 años en este campo, habiendo fabricado, entre otros, parte de los trenes de la línea de metro de Madrid. Como novedad en Honolulu Rail Transit, todo el sistema estará automatizado, es decir, los trenes no necesitarán conductor. Esta tecnología ya está implantada en el metro de Copenhague, Milán y Roma con buenos resultados. Entre sus ventajas se encuentran:

- Tener un horario programado, con el que se evitan retrasos y horas aproximadas de llegada.
- La parada de trenes en puntos exactos, lo cual es necesario al usar puertas de seguridad en los andenes.

- Mantener una velocidad y frenado constante, evitando cambios bruscos de velocidad que produzcan molestias a los pasajeros.

Una vez esté completada la construcción de la línea, se contará con una flota total de 40 trenes. Cada uno consistirá en una pareja de vagones al principio, pero se han diseñado de tal forma que se pueda ampliar cada tren a 3 o 4 vagones en el futuro.

Con estos números se estima que se reduzca el tráfico aproximadamente en 30000 vehículos al año. No solo se reducirán los atascos, si no la contaminación producida por los coches. Además, facilitará la comunicación dentro de la isla, tanto para habitantes como turistas.

Desde hace un año se está realizando el estudio acústico y electroacústico de todas las estaciones de la línea, así como de la zona de mantenimiento y cocheras y de los trenes. Ya se ha concluido el diseño de las tres primeras estaciones, así como parte de la zona de mantenimiento y la simulación del interior de los trenes. Se estima que se terminará el diseño de las 21 estaciones para el año 2015, proporcionando así la información necesaria para la construcción de todas ellas.

Este proyecto se centrará en el diseño de la estación Waipahu Transit Center.

3. Waipahu Transit Center

La estación de Waipahu Transit Center es la número 5 de la línea de tren y se encuentra entre las estaciones de West Loch y Leeward Community College.

Está situada en Waipahu, al noroeste de Honolulu. Waipahu es un “lugar designado por el censo”, nomenclatura que reciben ciertas áreas de población en Estados Unidos, las cuales se consideran partes de un condado, en este caso el condado de Honolulu.

Waipahu proviene del nombre de un pozo artesiano que se encontraba donde hoy está la ciudad. En hawaiano, Waipahu viene de *wai*, que significa agua, y *pahū*, que significa brotar. Los nativos hawaianos lo llamaron así por el agua que brotaba de este acuífero.

La estación está ubicada en la zona central de Waipahu, donde se construirá, al igual que el resto de estaciones, en un paso a nivel. Se utilizará la zona central de la carretera que pasa por debajo, Farrington Highway, para realizar la cimentación y estructuras que soportarán la estación (Figura 3.1).

Cada estación está diseñada individualmente para reflejar la historia y la cultura de la comunidad en la que está situada. Para ello contarán con piedras y plantas locales, motivos hawaianos en paredes y suelos, y los colores propios de la isla.

Todas tienen las siguientes características comunes:

- Están diseñadas de forma sostenible, como iluminación de bajo consumo y dispositivos de ahorro de agua.
- En los andenes se instalarán toldos que protegerán de la lluvia y el sol, así como pantallas de viento y asientos. Además, tendrán puertas de seguridad en los límites de las vías para evitar caídas.
- Todas las estaciones están diseñadas para cumplir con los requisitos de *Americans with Disabilities Act* (ADA), el cual especifica las condiciones para accesibilidad de personas con discapacidad.
- Cuartos de baño disponibles.
- Escaleras mecánicas y ascensores.

Cabe destacar que todas las estaciones están al aire libre debido al clima tropical existente en la isla.

La temperatura en Honolulu es de aproximadamente 20°C a lo largo de todo el año, con una temperatura media mínima de 13°C en invierno y una máxima de 29°C en verano. Gracias a este clima, no es necesaria la instalación de sistemas de aire acondicionado o calefacción y se pueden mantener zonas abiertas.

Debido a este diseño, se presentarán ciertos problemas al realizar las simulaciones de la estación, ya que el software utilizado está pensado para zonas cerradas. En el capítulo de simulación se explicará con más detalle.

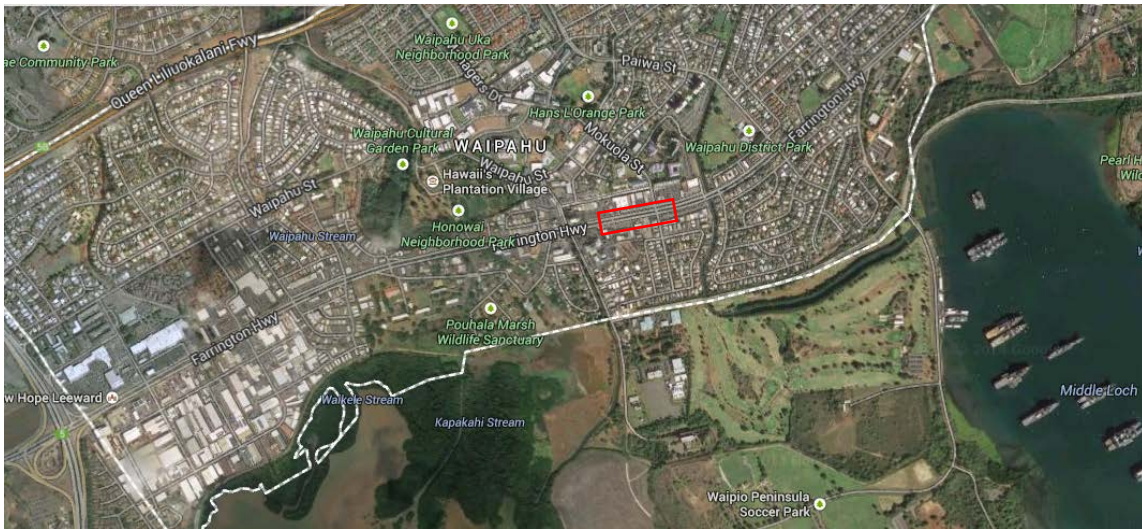


Figura 3.1: Situación de la estación en Waipahu, Honolulu (Google Maps)

La estación está compuesta por tres niveles superpuestos que facilitan el acceso desde la entrada a los andenes. Éstos son:

- Nivel inferior o *ground level*: se encuentra a nivel del suelo. Contiene la entrada a la estación, tornos, taquillas para la compra de billetes, cuartos de mantenimiento y control, escaleras y ascensores para el acceso a niveles superiores.

- Vestíbulo o *concourse level*: se encuentra encima del nivel inferior a unos 9 metros de altura sobre la carretera. Se compone de un pasillo que cruza por debajo de las vías, conectando los dos andenes.

- Andenes o *platform level*: nivel superior que se encuentra a unos 14 metros sobre el nivel de suelo, en el que se encuentran los andenes en los que realizarán las paradas los trenes.

Para realizar una simulación en EASE, se deben insertar áreas de audiencia que corresponden con las áreas en las que se quieren realizar mediciones. Debido a que estas áreas están superpuestas, realizar la simulación cambiando entre las zonas de medición sería una labor compleja y tediosa. Además, los cálculos para la transmisión de sonido entre suelos y techos no están integrados en el programa.

Por ello, para facilitar el diseño y el cómputo de las simulaciones, se ha decidido dividir la estación en tres partes por separado, que corresponden con las tres áreas independientes que componen la estación.

Finalmente, se ha de manifestar que todos los planos y diseños de este proyecto pertenecen al Gobierno de Estados Unidos. Este país tiene unas leyes muy estrictas en cuanto a la divulgación de la información, como en este caso, de proyectos del Estado.

Debido a esto, el autor tuvo que firmar un contrato de confidencialidad en el que acordaba no divulgar la información proporcionada para la realización del diseño acústico. Por esta razón, no se puede adjuntar ningún plano de la estación para describirla y mostrar sus dimensiones, materiales y características.

No obstante, la página web oficial de Honolulu Rail Transit Project [1] contiene información pública sobre el proyecto. En esta página se pueden encontrar las ubicaciones de las estaciones, planos de la línea de tren, diseños 3D y diseños conceptuales de las estaciones.

A pesar de no poderse incluir planos de la estación, se proporcionarán diseños gráficos de ésta para poder describirla mejor, además de servir como referencia en el diseño realizado posteriormente. A continuación se describirán los diferentes niveles de la estación de acuerdo con la información disponible.

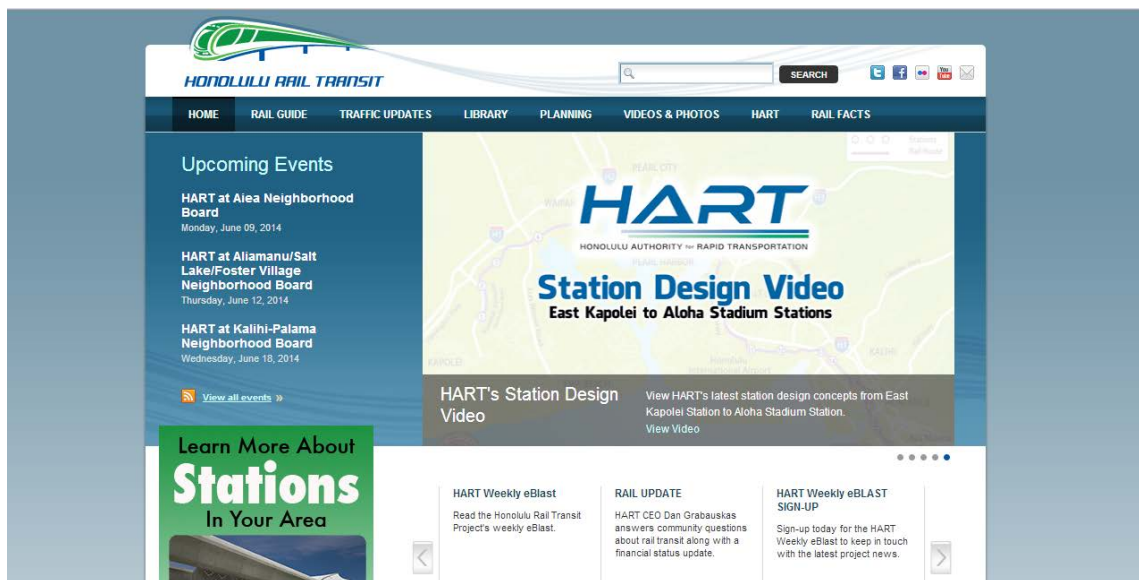


Figura 3.2: Portada de la página web oficial de Honolulu Rail Transit

3.1.1. Ground Level

Es el nivel inferior de la estación. En éste se encuentra la entrada, diseñada, al igual que los andenes, con una tela para proteger contra las inclemencias climáticas a los usuarios.

La primera zona contiene las máquinas para la compra de billetes, así como los tornos para la entrada y salida de la estación. En esta zona exterior habrá aparcamientos para bicicletas y un área llamada *Kiss and Ride*, pensada para los estacionamientos de vehículos de corto plazo, de ahí el nombre.

Tras acceder al recinto interior, se encuentran tanto las escaleras convencionales como las escaleras mecánicas a la izquierda que unen la parte baja de la estación con el Concourse Level. Esta zona está cubierta por un tejado de cristal, proporcionando luminosidad a la entrada, así como protección contra la lluvia. Recorriendo el pasillo lateral derecho se llega al ascensor, con acceso hasta el andén con dirección a Mauka.



Figura 3.3: Diseño 3D de Waipahu Transit Center. Entrada a la estación

Todo este recorrido es paralelo a la zona de mantenimiento, la cual se compone por salas independientes. Todas tienen un falso techo a 2,65 m, en los que se podrán instalar altavoces. Estas salas son:

- Cuarto de basuras.
- UPS (*Uninterruptible Power Supply*), fuente de alimentación ininterrumpida.
- TCCR (*Train Control and Communications Room*), en la que se encuentran los equipos de telecomunicaciones de la estación.
- Sala eléctrica.
- Cuarto de baño.
- Cuarto de mantenimiento.
- EMR (*Elevator Machine Room*), sala de mantenimiento del ascensor.

3.1.2. Concourse Level

Este nivel es prácticamente un pasillo de aproximadamente 65 m. Está diseñado de tal forma que es perpendicular a las vías del tren, facilitando el acceso a los dos andenes del nivel superior.

En los extremos del pasillo se encuentran las escaleras y ascensores. En el lado correspondiente a Mauka, que conecta con el nivel inferior, hay tanto escaleras de subida como de bajada y escaleras mecánicas. En cambio, en la dirección de Makai el acceso a la zona inferior está cerrado, ya que se trata de una zona restringida de mantenimiento. Este lado tiene sólo escaleras de subida.

Todo el nivel está delimitado a ambos lados por unas barandillas de 3' 10" (aproximadamente 1,16 m). Éstas están compuestas por una rejilla metálica, por lo que se simularán como un material altamente absorbente, es decir, que apenas reflejan las ondas acústicas. Junto a estas barandillas se encuentran también los pilares que sujetarán el nivel superior. Serán utilizados para el montaje de los altavoces en este nivel.



Figura 3.4: Diseño 3D de Waipahu Transit Center. Vista aérea

La mayor parte del Concourse Level tiene un techo a 4,5 m de altura, aunque la zona que corta con las vías del tren está a una altura menor (2,44 m). Esto se debe a que las vías se encuentran por debajo del nivel de suelo del piso superior.

Además, el techo está compuesto de hormigón. Para añadir absorción acústica al recinto y mejorar los niveles de inteligibilidad, se han introducido mantas acústicas en el techo. Los coeficientes de absorción de este material se pueden ver en el capítulo de diseño.

3.1.3. Platform Level

Es el último nivel de la estación. En éste se encuentran los andenes donde realizarán paradas los trenes.

Tiene conexiones a ambos lados con Concourse Level mediante escaleras y ascensores. Los pasillos que unen estos accesos con los andenes están cubiertos de techados metálicos corrugados. Al igual que en el nivel anterior, estos pasillos están delimitados por barandillas de 1,16 m de altura y pilares para la sujeción de los techados metálicos. Estos pilares se aprovecharán también para el montaje de los altavoces (Figura 3.4).



Figura 3.5: Diseño 3D del andén de Makai y Concourse Level

A través de estos pasillos se accede a los andenes. Miden un total de 72 m de largo y 4 metros de ancho. Al ser ambos andenes prácticamente iguales, para poder diferenciarlos se le ha asignado un nombre a cada uno, dependiendo de la dirección a la que se dirige el tren. Éstos son:

- Mauka, que en hawaiano significa “hacia la montaña”, es decir, hacia el interior de la isla.
- Makai, el opuesto de Mauka. Significa “mar adentro” o “hacia el mar”.

Esta terminología se ha utilizado porque son expresiones muy usadas entre los hawaianos, debido a su pasado lingüístico. Aun siendo el inglés el idioma más utilizado, hay términos y expresiones que están muy extendidos, por lo que se han introducido en el inglés hablado en la isla.

Lo que más llama la atención de la estación son las telas que cubren los andenes. El diseño de los andenes salió a concurso para decidir qué diseño representaría mejor la cultura hawaiana.

El diseño que salió elegido se basaba en las velas de los barcos usados por los nativos hawaianos. Esta idea es un ejemplo de la intención de construir las estaciones de forma que estén relacionadas con el entorno y la cultura hawaiana (Figura 3.5). Por ello, los andenes cuentan con unas lonas de tela a una altura de 5 m que cubren el largo de los andenes, proporcionando resguardo.

A su vez, los pilares que las sujetan están basados en cocoteros, muy comunes en la isla. Cuentan con un sistema de recolección y drenado de agua en su interior que reaprovecha el agua para usos dentro de la estación.



Figura 3.6: Comparación entre la ilustración de un barco hawaiano (por John Webber) y el andén de una estación

Para sujetar éstas lonas se han diseñado unas vigas metálicas que se unen con los pilares al lado del andén. Éstas representan las ramas que salen de los cocoteros. En estas vigas se instalarán los paneles de mensajes que indican el tiempo de llegada de trenes e información adicional. Se aprovecharán para realizar el montaje de los altavoces, situándose por encima cada andén para conseguir una cobertura mayor.

Finalmente, los andenes cuentan con unas puertas de seguridad que evitarán la caída de personas a las vías mientras no se encuentren trenes en la estación, llamadas PSG (*Passenger Screen Gates*). Están hechas de cristal, con una altura de 1,6 m. Se han automatizado para abrirse en concordancia con el tren una vez efectúe parada en la estación.

4. Objetivos y requisitos técnicos

HART ha dispuesto una serie de requisitos técnicos para conseguir una correcta calidad de señal en las estaciones, así como protecciones necesarias en los equipos y prevención de fallos. Estos requisitos se han proporcionado como documentos llamados TP o *Technical Provision*, aunque al igual que los planos, debido a la confidencialidad no se pueden reproducir explícitamente. A pesar de esto, sí se pueden dar los valores necesarios a cumplir en parámetros como STI o redundancia.

A continuación se exponen estos, así como otros requisitos que no pertenecen a este conjunto pero han de cumplirse igualmente.

4.1. Calidad de la señal

La calidad de señal emitida por los altavoces es el primer parámetro que ha de cumplirse en una instalación de refuerzo sonoro. La calidad de la señal se puede medir mediante dos factores: nivel de la señal respecto al nivel de ruido de fondo o SNR (*Signal to Noise Ratio*); y la inteligibilidad, la cual evalúa si la señal recibida es entendida correctamente.

El cliente no ha proporcionado requisitos en cuanto a nivel de señal, pero sí se ha dispuesto que han de cumplirse los requisitos referidos a ésta en la norma NFPA72. Esta norma es el Código de Alarmas de Incendio, la cual especifica los requisitos necesarios a cumplir en sistemas de alarmas contra incendios [2].

4.1.1. Nivel de señal

Para el diseño acústico de la estación se especifica que han de cumplirse los requisitos de la norma NFPA72 referidos a niveles de señal. A continuación se muestran los relacionados con niveles de señal del Código Nacional de Alarmas de Incendio (edición de 1996), que se encuentran en la sección 6-3 Características Audibles.

6-3.1 Requisitos Generales

6-3.1.3 El nivel de presión sonora total producido por la combinación del nivel de presión sonora ambiental con el de todos los aparatos de señalización audibles funcionando no debe exceder los 120 dBA en ningún lugar del área ocupada.

6-3.2 Requisitos para las Señales Audibles, Modo Público.

6-3.2.1 Los aparatos de señalización audibles que operen en modo público deben poseer un nivel sonoro de no menos de 75 dBA a 10 pies (3 m) y de no más de 120 dBA en el punto más cercano desde donde se escucha la señal de los aparatos audibles.

6-3.2.2 Para garantizar que las señales audibles de modo público se escuchen claramente, éstas deben poseer un nivel sonoro de al menos 15 dBA por encima del nivel sonoro ambiental promedio, o de 5 dBA por encima del máximo nivel sonoro que tenga una duración de al menos 60 segundos, adoptando el valor que resulte mayor, medido a 5 pies (1,5 m) sobre el nivel del piso en el área ocupada.

6-3.5 Ubicación de Aparatos de Señalización Audibles

6-3.5.1 Cuando la altura del techo lo permita, la parte superior de los aparatos montados sobre los muros debe estar a una altura de no menos de 90 pulgadas (2,30 m) por encima de la superficie acabada del piso y no menos de 6 pulgadas (152 mm) por debajo del nivel acabado del techo. Este requisito no impedirá el uso de aparatos montados sobre el techo o empotrados.

4.1.2. Inteligibilidad

Al tratarse del diseño de un sistema de refuerzo sonoro en una estación de tren, uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta es la inteligibilidad del habla. Se puede medir mediante varios parámetros, aunque el más utilizado es el STI (*Speech Transmission Index*). Éste indica el grado de comprensión de un mensaje en el receptor mediante la evaluación de la degradación de la señal de habla. Para ello, se comprueba la pérdida de la modulación del habla, que es afectada tanto por el ruido de fondo, como por las propiedades de la sala y los emisores.

Como este parámetro depende del mensaje emitido, dependerá también de si la voz es femenina o masculina. A pesar de ello, está establecida una escala en la que 1 es el valor máximo (excelente calidad) y 0 el valor mínimo (muy mala calidad).

Se debe asegurar que el sistema PAGA proporcionará un STI de 0,5 o mayor en al menos el 90% en el total de las zonas cubiertas en la estación.

Este nivel de STI corresponde con un AI (*Articulation Index*) de 0,5, que concuerda con un valor de 0,7 de CIS (*Common Intelligibility Scale*).

Además, se debe asegurar que el sistema PAGA proporcionará un STI de 0,4 o mayor sobre el 100% del total de las áreas cubiertas en la estación.

Este nivel de STI corresponde con un AI (*Articulation Index*) de 0,36, que concuerda con un valor de 0,6 de CIS (*Common Intelligibility Scale*).

4.2. Protección de equipos

Todos los equipos que tengan que estar en ambientes exteriores, tales como altavoces, micrófonos o contactos eléctricos, deben cumplir:

- Resistencia total al agua.
- Ser diseñados, fabricados y probados para funcionar con una temperatura entre -4 y 131 grados Fahrenheit (entre -20°C y 55 °C) con humedad del 5% al 95%.
- Resistencia a la corrosión.
- Ser resistentes a impactos y contra vandalismo.

El resto de equipos que no sean exteriores deben cumplir:

- Deben operar sin ninguna degradación perceptible con una temperatura entre 0 y 104 grados Fahrenheit (entre 0°C y 40 °C) con humedad del 5% al 95%.

4.3. Buy American Act

Se trata de una ley americana de 1933 en la que se dispone que el gobierno ha de comprar siempre que sea posible, materiales y bienes que sean *American-made*. Un producto se define como *American-made* cuando al menos el 50% de sus componentes y materiales son originarios de Estados Unidos [3].

Esta ley es un requisito que ha de cumplirse en cualquier proyecto realizado o financiado por el gobierno de los Estados Unidos. Su objetivo es impulsar la creación y uso de empresas estadounidenses, haciendo así que la mayor parte del capital utilizado en proyectos de obras públicas quede dentro del país. Además, es una forma de promover los productos nacionales, como en el caso de Honolulu Rail Transit, donde prácticamente todos los equipos del sistema PAGA cumplirán con este requisito.

4.4. Redundancia

Para realizar el cálculo de amplificadores se ha de tener en cuenta la redundancia necesaria para que, en caso de fallo de un amplificador o si se quisiese ampliar el sistema posteriormente, no existiese ningún problema. Para ello ha de cumplir lo siguiente:

Se deberá usar una cantidad suficiente de amplificadores/mezcladores en cada TCCR para proporcionar un canal de salida de audio para zona de PA, más uno extra de repuesto que sirva de redundancia.

Por ejemplo, si el número de canales para un TCCR es 4, entonces se necesitarán un total de 5 canales.

Además, los equipos conectados a un mismo canal de amplificador consumirán como mucho la mitad de la potencia de éste, es decir, cada canal tendrá al menos un 50% de redundancia.

Por ejemplo, si un amplificador tiene 4 canales de 300 W, se conectarán equipos a cada canal hasta alcanzar como mucho 150 W.

4.5. Protección contra fallos

Para evitar que un área de la estación con alto nivel de ruido se quede sin señal de alarma, cada zona independiente deberá de ser capaz de estar cubierta a pesar de que falle uno de los canales. Se consideran como áreas con alto nivel de ruido Concourse Level y Platform Level. Por ello, se deberán diseñar los bucles de altavoces de forma que en cada zona haya dos bucles independientes, tanto de cableado como de amplificador. En caso de que un amplificador fallase, cada una de las áreas seguiría cubierta por otro bucle.

Además, los andenes se tratarán como zonas independientes, por lo que será necesario aplicar este procedimiento en cada uno de ellos.

Finalmente, como última medida ante el posible fallo de los equipos, se deberá disponer de un equipo que realice el cambio entre los canales de los amplificadores en caso de que uno de éstos fallase. El uso de este equipo es indispensable para el uso de la redundancia de canales, ya que sin éste no se podrían utilizar los canales de reserva en caso de fallo de un amplificador.

5. Sistema PAGA (Public Address & General Alarm)

Un sistema de PA o sistema de refuerzo sonoro o de megafonía es un sistema de distribución y amplificación de señales acústicas. Está compuesto por micrófono, amplificador y altavoces, además de otros equipos, permitiendo emitir una señal en áreas con público. Normalmente son zonas grandes y ruidosas.

Este término es usado también para sistemas que adicionalmente pueden tener una mesa de mezclas y amplificadores y altavoces adecuados tanto para música como para habla, usado para reforzar una fuente de sonido así como música grabada o una persona hablando en directo. Los sistemas de PA simples se suelen usar en salas pequeñas como salones de actos, auditorios o restaurantes.

En cambio, los sistemas de megafonía más complejo se usan ampliamente para anuncios y mensajes en edificios comerciales, públicos o institucionales, así como son necesarios en entornos industriales.

5.1. Arquitectura del sistema

Un sistema PAGA simplificado está compuesto de los siguientes equipos:

- Procesador de señal
- Fuente de mensajes (reproductor de CD, PC o reproductor de mensajes de alarma)
- Micrófono
- Amplificador
- Altavoces

Mediante este sistema se pueden transmitir señales emitidas bien por el micrófono o bien por mensajes pre-grabados a través de los altavoces, que se alimentarán a través del amplificador.

Como se ha dicho, este es un sistema simplificado, por lo que podría contener mayor número de equipos y características.

La interconexión entre altavoces se realizará mediante una línea de alta impedancia o de tensión constante. Este tipo de conexionado está diseñado para utilizar un voltaje continuo de 25, 70, 70,7 o 100 V. Los dos últimos son los más usados en América y Europa, respectivamente. Este sistema se va a implementar en Estados Unidos, por lo que se usará la línea de 70,7 V.

Entre sus ventajas respecto a una línea de baja impedancia convencional se encuentran:

- Facilidad de conexionado, se pueden conectar los altavoces directamente a la línea sin necesidad de realizar conexionados en serie o paralelo para ajustar impedancias.

- Facilidad de expansión del sistema, en el que se pueden incluir posteriormente tantos altavoces como potencia pueda otorgar el amplificador.
- Menor pérdida de señal, debido a que la impedancia de entrada de cada altavoz es mucho mayor que la del cable.

Por ello, los equipos utilizados deberán ser compatibles con líneas de alta impedancia, entre ellos los amplificadores y altavoces.

Todos los equipos se encontrarán en un *rack* o estante metálico dentro de la sala de control de comunicaciones de la estación, llamada *TCCR (Train Control and Communications Room)*. En esta sala se encontrarán el resto de equipos de telecomunicaciones, por lo que para distinguir los diferentes subsistemas de telecomunicación se montarán los equipos de cada subsistema en el mismo rack. Esto implica que, además los equipos tienen que poder ser “enracables”, es decir, poder montarse en el rack, cuyas medidas son estándar.

5.2. Equipos

5.2.1. Alcatel-Lucent OmniSwitch 6850E

Se trata de un *switch* o conmutador de 24 puertos. Este equipo será el encargado de interconectar todos los equipos del sistema PAGA entre sí y con el resto de estaciones. Para ello, se realizará una red LAN (*Local Area Network*) en la que los conmutadores estarán conectados a un servidor central. Desde este se podrá acceder a los mensajes y situación de cada estación y se podrán controlar los equipos remotamente.

Su panel frontal dispone de 24 puertos RJ-45, 4 puertos de fibra óptica SFP, un puerto de control y un puerto USB 2.0. Cabe destacar que este equipo puede funcionar simultáneamente con IPv4 e IPv6.



Figura 5.1: Switch Alcatel-Lucent OmniSwitch 6850E

Para facilitar el seguimiento de su funcionamiento, este switch incorpora diodos LED (*Light-Emitting Diode*) que indica el estado del sistema así como el de cada puerto.

Este equipo se produce por la compañía Alcatel-Lucent [4]. Ésta surgió de la fusión entre la empresa francesa Alcatel y la estadounidense Lucent Technologies. Este equipo es producido en Estados Unidos, garantizando así el requisito *Buy America*.

5.2.2. Advantech ARK-3360F

Station Control Unit, SCU o Unidad de control de la estación es el ordenador central que controlará el sistema de alarma de la estación. Desde este equipo se accederá a todas las secuencias a reproducir por el sistema PAGA, además de poderse seleccionar los avisos y alarmas. Para ello llevará incluida una interfaz gráfica desde donde se podrán controlar todas las señales a emitir y los equipos.

Contiene un microprocesador Intel® Atom™ N450/D510 que funciona a una frecuencia de 1.66 GHz, 3 entradas de red GigaLAN, 6 puertos USB 2.0 y 6 puertos COM.



Figura 5.2: SCU ARK-3360F

5.2.3. BSS Audio Soundweb London Blu-100

Procesador de señal con 12 señales de entrada y 8 de salida, todas analógicas. Se caracteriza por tener una buena respuesta en frecuencia, de 20 Hz a 20 kHz con una variación de +0,5dB/-1 dB. Su distorsión armónica (THD) es de 0,01% en todo su espectro. Además cuenta con una baja latencia.

BSS Audio [5] es una empresa filial de Harman International Industries [6], compañía americana que posee otras marcas conocidas como AKG Acoustics, Crown International y JBL. Debido a esto, este equipo asegura el cumplimiento del requisito *Buy America*.



Figura 5.3: Frontal y parte trasera del procesador Soundweb London Blu-100

5.2.4. Crown DCi Network 4N/300

Se trata de un amplificador de 4 canales de 300 W de potencia para líneas de alta impedancia de 70,7 V. Tiene una buena respuesta en frecuencia, de 20 Hz a 20 kHz con una variación de $\pm 0,25$ dB, y una baja distorsión armónica (THD), de 0,35% en todo su espectro a máxima potencia.

Es un amplificador de clase D, que se caracteriza por tener una gran eficiencia respecto a otras clases de amplificadores. Debido a que tiene menor pérdida de energía, su peso disminuye, ya que se necesitan menos disipadores de calor.

Además, posee conexión a red mediante enlace Blulink, el cual es un tipo de bus digital de audio desarrollado por BSS. Se caracteriza por conseguir un alto ancho de banda con muy baja latencia. Además, permite transportar hasta 256 canales de audio a 48 KHz ó 128 canales a 96 kHz, en 24 bits, por un solo cable CAT5. Su conexión se realiza mediante la interfaz RJ-45, típica de redes Ethernet y LAN.



Figura 5.4: Parte trasera del amplificador Crown DCi Network 4N/300

La marca Crown International [7] lleva casi 70 años manufacturando equipos electrónicos, sobre todo amplificadores y micrófonos actualmente. Esta empresa procede de Estados Unidos, y tal como se ha dicho, pertenece a la compañía Harman International Industries, cumpliendo con el requisito *Buy America*.

5.2.5. Crown CT16S

El *failover switch* o conmutador contra fallos es un equipo diseñado, tal como su nombre indica, para realizar la conmutación entre los canales principales de los amplificadores y los canales de redundancia en caso de que los primeros fallasen.

Como se ha especificado en los requisitos, en el sistema PAGA que se desea diseñar es necesario tener un sistema contra fallos. En caso de que un amplificador fallase, una parte de la estación dejaría de estar cubierta acústicamente. Por ello, se conectan todos los canales de los amplificadores a este equipo, estando al final del conexionado.

Este equipo admite hasta 1000 W de potencia por canal de entrada. Tiene 16 entradas de canales primarios, 16 entradas para canales de redundancia y 16 salidas. Además, en la parte frontal incorpora diodos LED que indican qué canales están funcionando en cada momento (Figura 5.5).

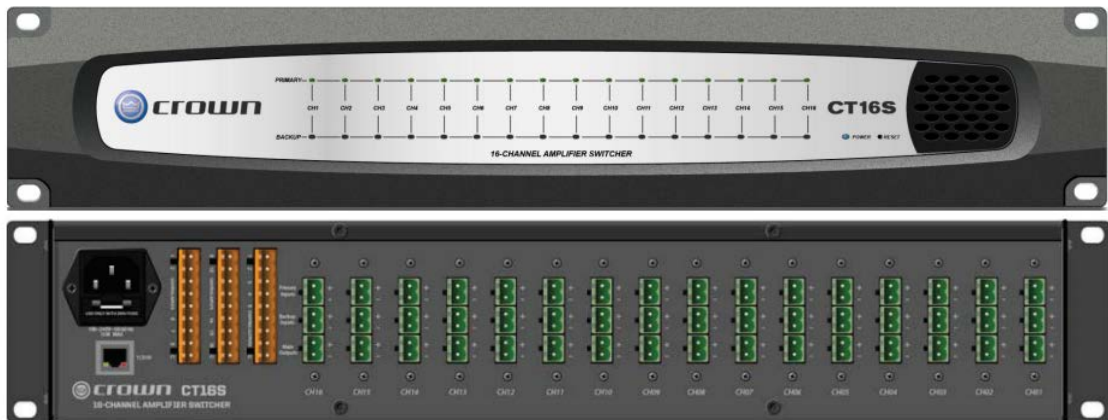


Figura 5.5: Frontal y parte trasera del failover switch Crown CT16S

Gracias a su diseño se pueden realizar diferentes configuraciones, desde tener un canal de redundancia por cada canal principal hasta tener un único canal redundante en caso de que fallase uno de los 16.

Su funcionamiento es sencillo: cuando detecta que un canal primario se ha desconectado cambia instantáneamente a un canal de redundancia, operando como lo había hecho hasta ese momento. En caso de que el canal primario volviese a la normalidad, cambiaría a éste de nuevo, dejando libre otra vez el canal redundante.

Para facilitar el control y la configuración de este equipo desde la estación de control, incluye una entrada para conexión de red y entradas de control.

Al igual que los amplificadores, este equipo cumple con el requisito *Buy America*.

5.2.6. OBO Betterman B9/T

Esta *junction box* o caja de conexiones es una carcasa plástica utilizada para realizar las uniones de cableado, permitiendo dividir la señal de audio a diferentes equipos, como en el caso de los altavoces, sin que el cableado ni las conexiones estén expuestos.

Está diseñada para ser totalmente impermeable. Su cubierta está cerrada herméticamente y posee unas membranas en los laterales que permiten introducir los cables haciendo el interior, pero evitan que entre agua en el interior y se produzcan cortocircuitos.



Figura 5.6: Junction box OBO Betterman B9/T

Parte de la estación en la que se va a implementar el sistema PAGA está completamente abierta, como los andenes o el pasillo que los une. El uso de esta *junction box* asegura el conexionado en estas zonas exteriores y evitará el deterioro y fallos en el sistema que se puedan producir por inclemencias climáticas.

5.2.7. Penta TBMS™ con micrófono Shure 527B

Se trata de una estación de control desde la que se podrá emitir información, señales de aviso y reproducir mensajes grabados previamente a través del sistema PAGA.

Lleva incorporado un micrófono Shure 527B para la transmisión de mensaje de voz. Se trata de un micrófono dinámico de baja impedancia, por lo que no necesita potencia adicional. A pesar de tener una mala respuesta en frecuencia, entre 300 Hz y 5 kHz (Figura 5.7), ésta es suficiente para captar el rango de frecuencias de la voz humana.

Tanto la estación de control como el micrófono son de fabricación estadounidense [8], por lo que cumplen con el requisito Buy America.

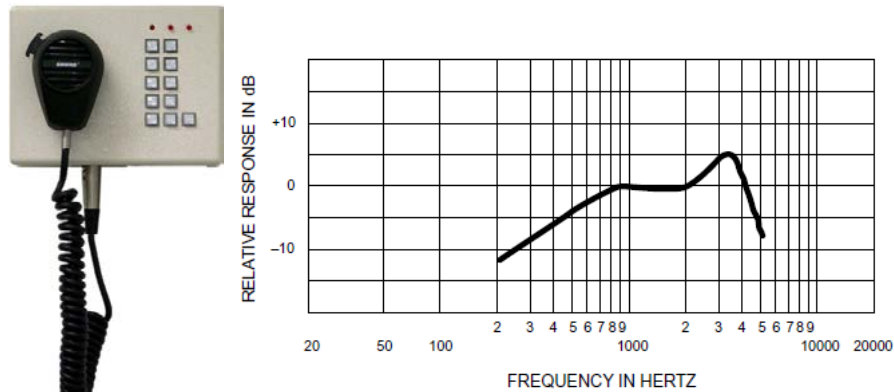


Figura 5.7: Penta TBMS™ con micrófono Shure 527B y su respuesta en frecuencia

5.2.8. Crown PZM®-11LLWR

Ambient Noise Sensor, ANS o micrófono de ruido ambiente. Tal como ya se ha mencionado, se desea obtener el nivel de ruido tanto en *Concourse level* como en *Platform level* para poder variar la potencia emitida por los altavoces. Para ello se eligió el modelo PZM-11LLWR de la marca Crown.

Se trata de un micrófono de zona de presión o PZM® (*Pressure Zone Microphone*), patentando por la marca Crown. Su respuesta en frecuencia no es muy destacable, de 80 Hz a 10 kHz (Figura 5.8). A pesar de esto, este micrófono se caracteriza por poder recibir señales acústicas sin que interfieran las reflexiones. Esta cualidad lo hace ser muy útil en el diseño de la estación, ya que se desea instalar los micrófonos en paredes.

Para conseguir este diseño, se sitúa el micrófono paralelo a una placa a una distancia muy pequeña. Esto hará que no se reciban señales reflejadas en la superficie en la que se encuentra el micrófono, recibiendo tan solo las señales directas. Este efecto se consigue hasta altas frecuencias, donde la longitud de onda ya es comparable con la distancia entre el micrófono y la placa.

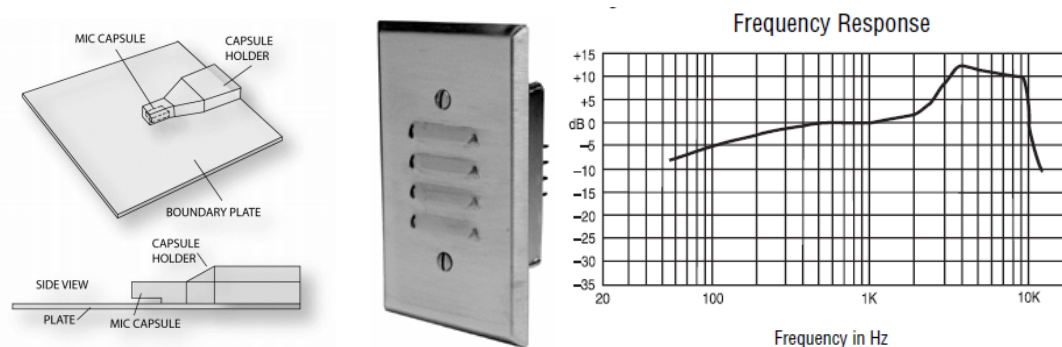


Figura 5.8: Interior y carcasa del micrófono Crown PZM®-11LLWR y su repuesta en frecuencia

Aplicando este diseño se consigue evitar el efecto de “filtro peine” o filtro comb. Este efecto se produce al sumar una señal con una reflexión retardada. Esto provoca que dependiendo de la frecuencia aparezcan máximos o nulos en la respuesta en frecuencia, dependiendo de si se trata de interferencias constructivas o destructivas (Figura 5.9). Esta coloración hace que los micrófonos no puedan situarse a cierta distancia de superficies reflectantes.

En cambio, el uso de micrófonos PZM[®] es ideal para casos como el de este proyecto, en el que se desea hacer una instalación fija de un micrófono en una pared para medir el nivel de ruido. De esta forma se logran dos ventajas: que no se sumen señales reflejadas produciendo el efecto de filtro peine y pudiendo así discernir el nivel real de ruido en la estación; y evitar que se pueda manipular o deteriorar el micrófono por la exposición al público, ya que el micrófono está diseñado contra vandalismo.

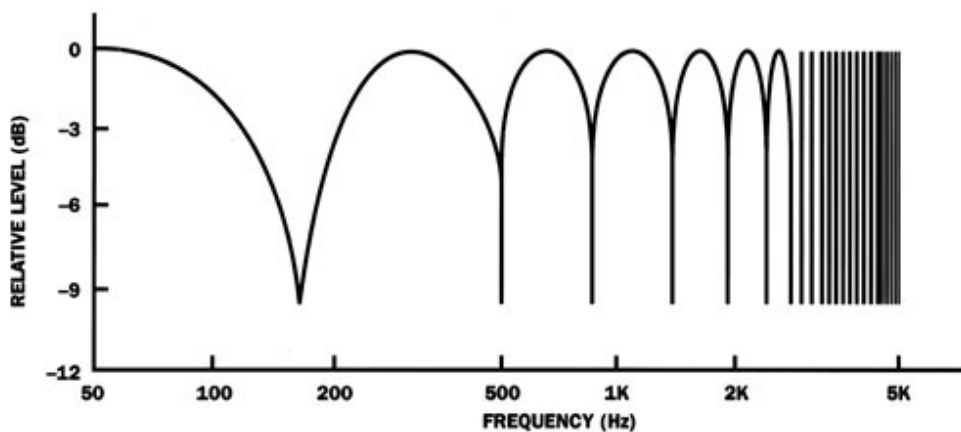


Figura 5.9: Respuesta en frecuencia típica de un filtro comb o filtro peine

Funciona entre -10°C y 60°C, aunque puede funcionar hasta -40°C variando su sensibilidad. Una vez vuelve a temperatura normal su sensibilidad puede haber variado +/- 3dB.

Este modelo incluye una carcasa para facilitar su colocación en paredes, además de estar protegido contra vandalismo.

Cada micrófono PZM[®] irá conectado a una fuente de alimentación de 24 V del modelo PULS MiniLine ML30.100.

Al igual que los amplificadores y el *failover switch*, este equipo cumple con el programa *Buy America*.

5.2.9. Penton RCS5T

Se trata de un altavoz de techo de 10 W ideal para líneas de alta impedancia. Su respuesta en frecuencia es de 100 Hz a 20 kHz (Figura 5.10) gracias a su sistema de 2 vías.

Este modelo incluye un transformador para líneas de alta impedancia de 70,7 V, en el que se puede seleccionar la potencia de éste, desde 0,25 W hasta 5 W.

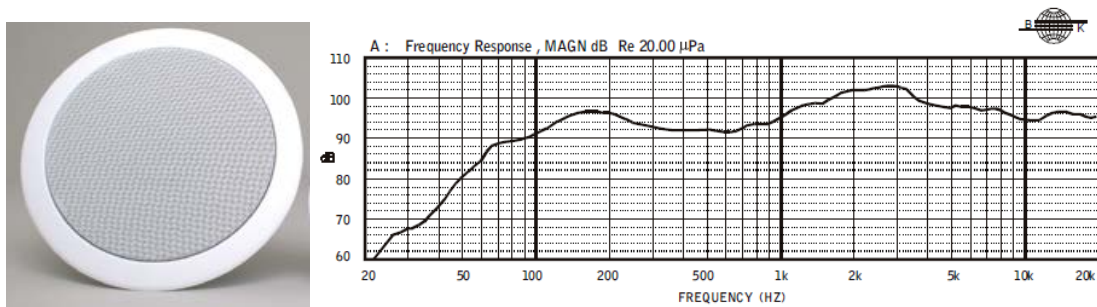


Figura 5.10: Altavoz de techo Penton RCS 5T72 y su respuesta en frecuencia

Viene provisto de un kit de montaje para techos. Éste consiste en una capsula que engloba el transformador en la parte trasera del altavoz, la cual está cubierta de material absorbente para evitar emisiones traseras. Esta capsula se puede instalar en una placa que encaja perfectamente con instalaciones con falso techo.

Pertenece a la empresa estadounidense Penton. Con esto se verifica que se cumple el programa *Buy America* indicado en los requisitos.

5.2.10. Atlas Sound APC-30T

Es un altavoz de bocina para exteriores con una potencia máxima de 30 W. Lleva incorporado un transformador para líneas de alta impedancia, pudiendo seleccionar desde 2 W hasta 30 W. Está diseñado con una bocina de exponencial que produce una gran directividad y aumento del nivel acústico en las zonas que apunta.

Este tipo de altavoces son los preferidos en sistemas de megafonía, ya que consiguen cubrir zonas concretas con un alto nivel de señal, además de ser completamente resistentes al agua, siendo perfecto para zonas a la intemperie o abiertas.

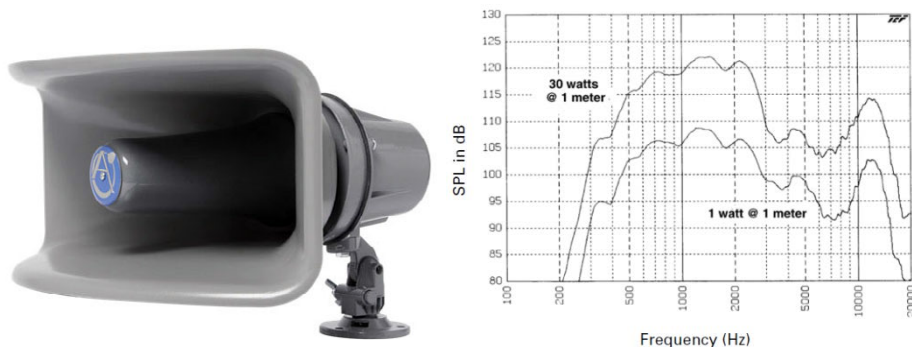


Figura 5.11: Altavoz de bocina Atlas APC-30T y su respuesta en frecuencia

Su respuesta en frecuencia no es su principal característica (300 Hz a 12000 Hz), pero en un modelo abocinado como éste se considera suficiente. Para el diseño de la estación interesa más la capacidad de emisión, directividad y resistencia a la intemperie que una buena respuesta en frecuencia.

Además, este altavoz es de la marca americana Atlas Sound [9], por lo que cumple con el programa Buy America.

5.2.11. Atlas Sound APT-34T

Altavoz bidireccional para exteriores con un máximo de potencia de 30 W. Está compuesto por dos altavoces de bocina de 15 W, los cuales logran una dispersión de 175°. Es resistente al agua, por lo que es perfecto para instalaciones al aire libre.

A pesar de tener una gran dispersión y ser ideal para exterior, su respuesta en frecuencia deja que desear (de 400 Hz a 12,5 kHz).



Figura 5.12: Altavoz bidireccional Atlas APT-34AT y su respuesta en frecuencia

Al igual que el modelo anterior, pertenece a la marca estadounidense Altas Sound, cumpliendo con el programa *Buy America*.

Al no disponer de este modelo en la base de datos de altavoces de EASE, se ha simulado como dos altavoces del modelo Altas Sound APC-15T, con 15 W de potencia y una respuesta en frecuencia parecida.

6. Nivel de ruido

Debido a que la estación aún no está construida, no se han proporcionado mapas ni niveles de ruido en las diferentes partes de la estación. A pesar de no tener estos datos, para la realización de las simulaciones se ha supuesto que el nivel que se tendrá en los andenes será el nivel máximo de ruido del tren.

Al igual que se han dado requisitos de nivel en la estación, también se han proporcionado requisitos técnicos al fabricante de los trenes, en este caso Ansaldo-Breda. Estos requisitos dados incluyen, entre otras cosas, los niveles de ruido máximos que podrán emitir los trenes. Indican lo siguiente:

El nivel de ruido promedio emitido por el vehículo no deberá exceder los siguientes niveles en vías no corrugadas y rectas con todos los equipos auxiliares funcionando simultáneamente:

- Vehículo parado, vacío: 68 dBA.
- Vehículo en movimiento, vacío, en vía recta horizontal a una velocidad de 40 m/h (equivale a 64,37 km/h).
- Vehículo en movimiento, con la máxima fricción debida al frenado desde una velocidad de 40 m/h (equivale a 64,37 km/h) con ruedas nuevas: 75 dBA.

Con estos datos se puede deducir que el nivel de ruido emitido por el tren será como máximo 75 dBA. Se tomará este nivel de ruido como referencia para realizar la sonorización de los andenes y la parte intermedia de la estación.

Este nivel de ruido está medido en banda ancha y con ponderación A, por lo que no se podrá introducir en EASE directamente, donde el nivel de ruido se introduce por cada tercio de octava. Para obtener un mejor resultado al realizar las simulaciones, se supondrá este nivel de ruido.

Normalmente, el nivel de ruido producido por un tren se mide como nivel de presión sonora continuo equivalente, es decir, el nivel de ruido que emite el tren en un tiempo T. Por ello, es difícil encontrar resultados de nivel ruido en frecuencia de trenes, aunque existen. Un ejemplo de ruido producido por el paso de un tren se encuentra en un estudio realizado en China [10].

En este proyecto, se realizaron medidas del nivel de ruido producido por trenes en diferentes zonas de una línea de tren en China. A partir de este estudio se obtuvieron datos de la respuesta en frecuencia del ruido del tren.

Para la realización de las medidas de inteligibilidad se adaptarán los resultados de este estudio, al no disponer de datos de nivel de ruido para poder introducir en EASE.

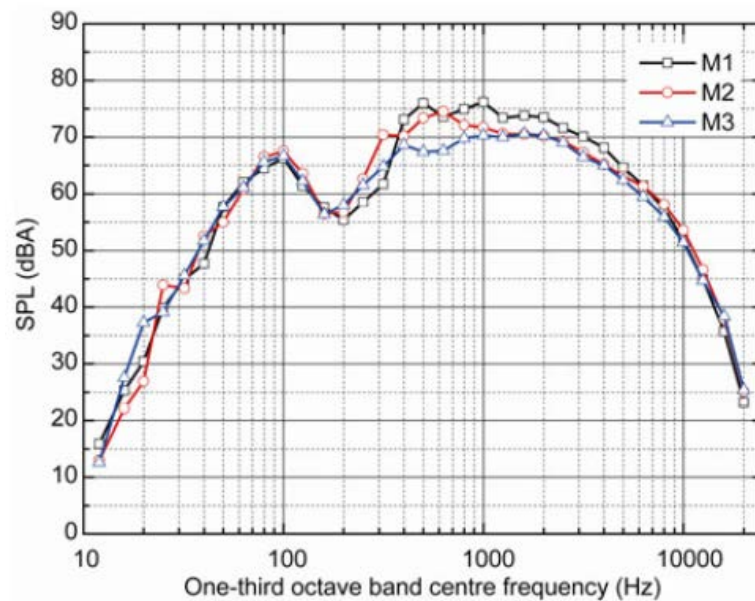


Figura 6.1: Nivel de ruido en frecuencia para el paso de un tren

Para obtener el nivel de ruido en frecuencia, se han obtenido los valores para cada tercio de octava de la gráfica. Con éstos se calcula el nivel en banda ancha y con ponderación A, el cual es 94 dBA. Como el ruido deseado tiene que tener un valor en banda ancha de 75 dBA, se ha de reducir.

Para ello, se ha de bajar el nivel a cada tercio de octava por igual hasta conseguir que la suma total, teniendo en cuenta la ponderación A, sea de 75 dBA. Con este procedimiento se mantendrá la forma del espectro de ruido, aunque con un menor nivel.

La comparación entre los niveles en tercio de octava para el nivel de ruido del proyecto original y los valores resultantes puede verse en la Figura 6.2. Como se puede observar, la diferencia entre cada nivel de tercio de octava es de 19 dB, la misma que la que existe entre los niveles en banda ancha.

Finalmente, los valores del nivel de ruido del tren a utilizar son los indicados en la Tabla 1. Estos serán introducidos posteriormente en los datos de las simulaciones en EASE para el cálculo de la inteligibilidad.

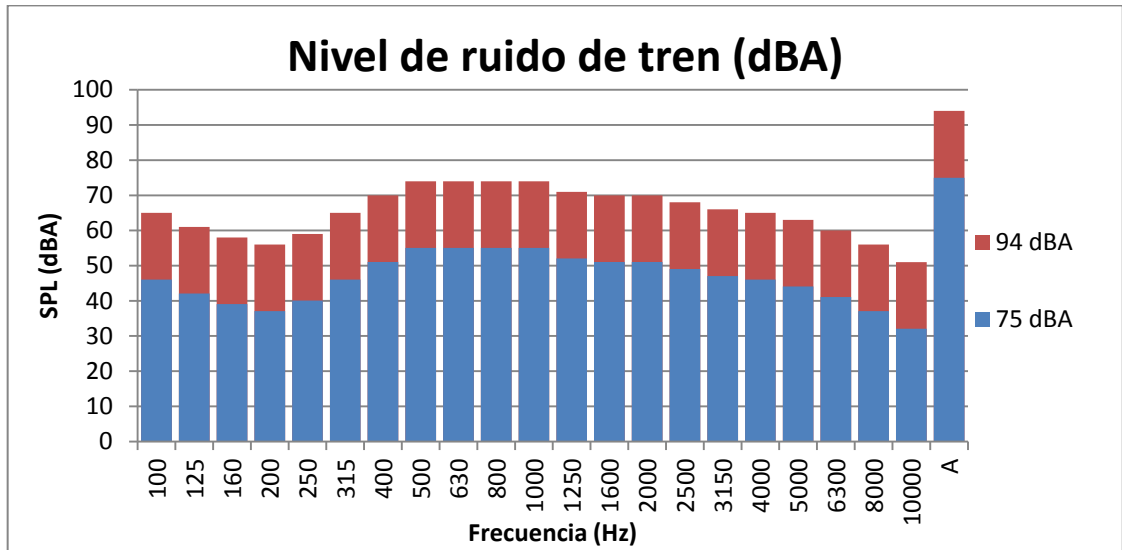


Figura 6.2: Espectro en tercios de octavas con ponderación A para el ruido del tren. En rojo, nivel de ruido original de 94 dBA; en azul, nivel de ruido calculado para 75 dBA

Tabla 1: Valores del ruido del tren en dBA para cada tercio de octava

Frecuencia (Hz)	Ruido de tren (dBA)	Frecuencia (Hz)	Ruido de tren (dBA)
100	46	1250	52
125	42	1600	51
160	39	2000	51
200	37	2500	49
250	40	3150	47
315	46	4000	46
400	51	5000	44
500	55	6300	41
630	55	8000	37
800	55	10000	32
1000	55		

7. Simulación acústica y electroacústica en EASE 4.4

EASE (*Enhanced Acoustic Simulator for Engineers*) es un software de simulación acústica y electroacústica diseñado por la empresa alemana AFMG. Este programa lleva en funcionamiento más de 20 años. El 1 de abril de 2014, durante la redacción de este proyecto, publicaron la última versión del software, 4.4.6.32.

A pesar de que el proyecto se empezó utilizando la versión anterior (4.3.9), se actualizó el software y se ha continuado con la nueva. Esta actualización no ha producido ningún cambio en las simulaciones hechas anteriormente, por lo que se considera que afecta solamente a la hora de designar el software.

Se trata de un programa con una interfaz algo obsoleta aunque eficaz. Para poder realizar la simulación de una sala ha de crearse en primer lugar el diseño mediante puntos y superficies. Más adelante, se introducen los altavoces y las áreas donde se desea realizar los cálculos. A partir de este momento se podrán hallar los valores de los parámetros deseados mediante simulaciones.

Posee además módulos secundarios que permiten realizar cálculos más precisos, obtener diseños en 3D de la sala con texturas e iluminación, auralizar una señal de audio o realizar simulaciones con equipos infrarrojos.

7.1. Materiales

En primer lugar se expondrán los materiales utilizados en la estación de tren. Al no poder utilizarse los planos, se explicará los materiales de los que está compuesta cada parte de la estación.

El cliente no ha proporcionado coeficientes de absorción de los materiales utilizados, por lo que para la simulación se han utilizado los materiales presentes en la base de datos de EASE más parecidos. Estos son los siguientes:

- *a=80%*: absorbente 80%; utilizado en las vallas que delimitan la estación y la tela que cubre los andenes.

- *CONCRETE S*: hormigón liso; material con el que se construirá la mayor parte de la estación, como suelos, paredes y techos.

- *TILE, FLOOR*: suelo de baldosas; usado en los suelos de las salas cerradas de mantenimiento.

- *WIND GLASS*: ventana de cristal; utilizado en las superficies de cristal de la estación, tales como el ascensor, barandillas de las escaleras mecánicas y puertas de seguridad en los andenes.

- *STEEL*: acero; material utilizado en los techados que cubren los pasillos de enlace con los andenes y las escaleras.

- *DOOR SOLID*: puerta sólida; tal como su nombre indica, se usa en las puertas de las salas de mantenimiento.

- *PLYWD 3/8*: contrachapado de 3/8 de pulgada (1 cm); se utiliza en el techo de las salas de mantenimiento, aportando absorción a éstas.

Aparte de estos materiales, se ha incluido otro que no estaba presente en la base de datos de EASE. Corresponde con:

- *INSULATION BATT*: manta de fibra de vidrio de 2,5" (7 cm) de grosor de la marca Owens Corning® [11]; se ha instalado en los techos del pasillo en Concourse Level para proporcionar aislamiento acústico y reducir las reflexiones y el tiempo de reverberación en éste.

Se ha creado introduciendo sus valores de absorción para cada frecuencia en la ventana de propiedades de material (Figura 7.1). Se ha incluido en la base de datos de EASE para poder tener acceso a éste más adelante.

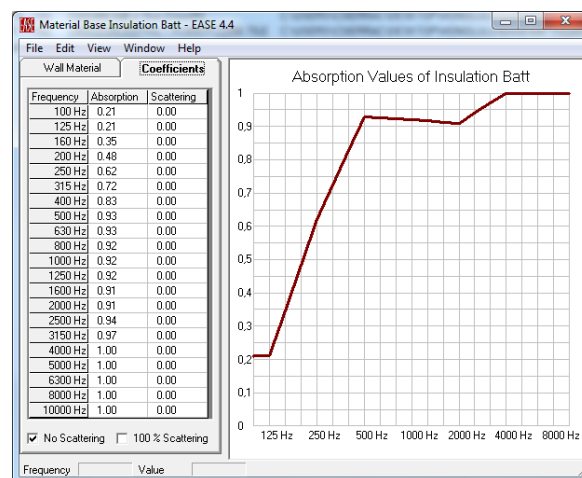


Figura 7.1: Ventana de propiedades de un material

Los coeficientes de absorción de todos los materiales utilizados en las simulaciones son los expuestos en la Figura 7.2.

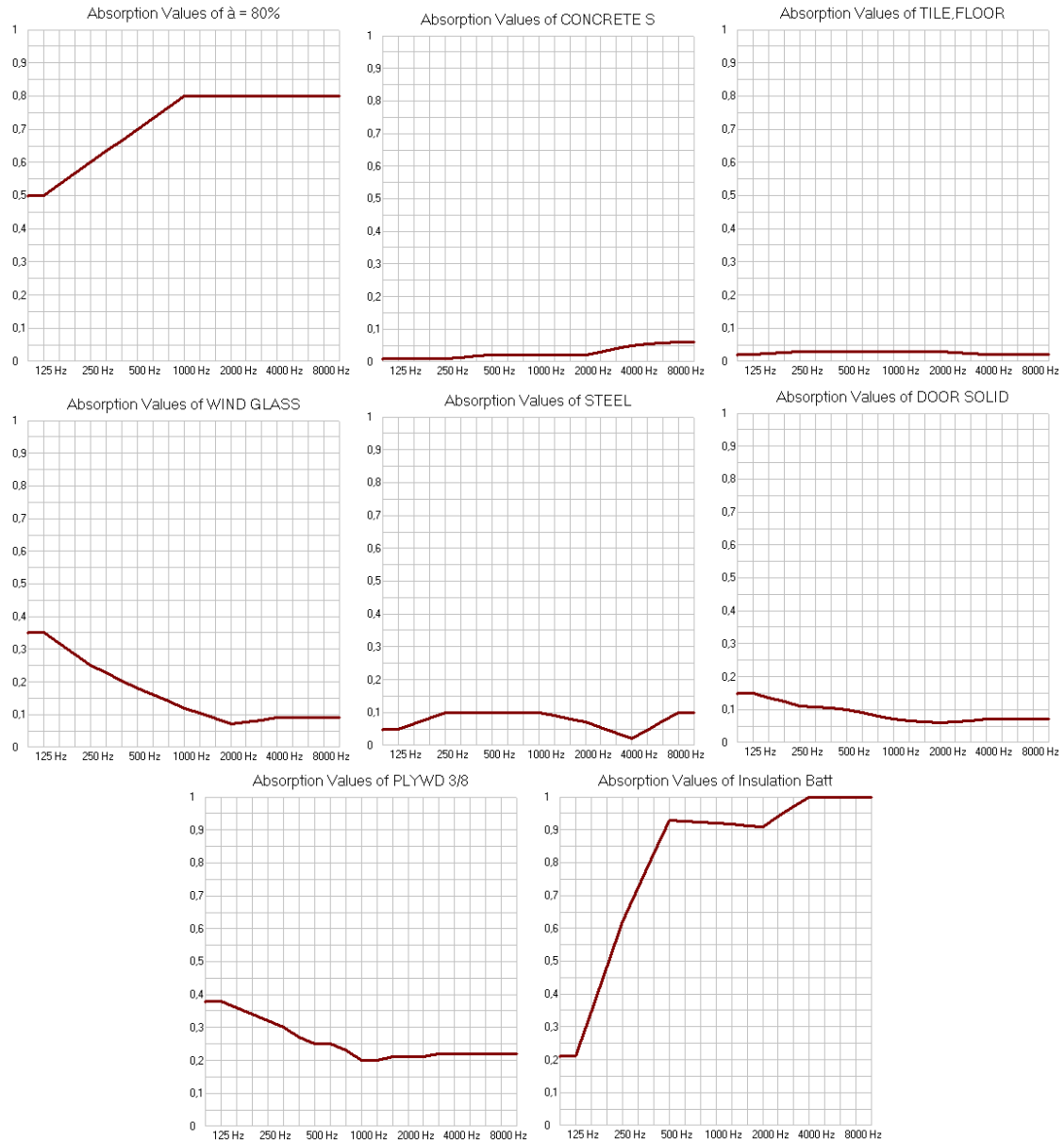




Figura 7.2: Coeficientes de absorción de los materiales usados


7.2. Modelado 3D

Existen varias formas para realizar un diseño en EASE. Una de ellas consiste en importar un proyecto desde AutoCAD u otros programas de diseño 3D. De esta estación tan sólo se han proporcionado planos en dos dimensiones, por lo que esta opción no se puede aplicar.

La principal forma de diseño en EASE consiste en crear el modelo desde un proyecto en blanco. Para ello, desde la pantalla principal se crea un proyecto nuevo, eligiendo la dirección destino. Desde ésta se pueden seleccionar los distintos módulos de los que se compone EASE, desde el diseño del proyecto, la realización de simulaciones por *Area Mapping*, *AURA* o *Ray*

Tracing, hasta el módulo EARS desde el que se puede realizar la auralización de un fichero de audio. Seleccionando el botón  o *Edit Project Data* aparecerá una nueva ventana en la que se podrá comenzar a realizar el diseño.

En primer lugar se deben introducir los vértices que corresponderán con los límites de las superficies. Para ello, se selecciona *Insert → Vertex*, el botón  o presionando en el teclado 'V'. Aparecerá una ventana en la que se podrán modificar las coordenadas del vértice. Una forma de acelerar este proceso consiste en seleccionar un vértice, y pulsando el botón derecho del ratón seleccionar *Duplicate*. Esta acción duplica el punto a una distancia indicada en los 3 ejes de coordenadas. De esta forma se podrán realizar diseños sabiendo simplemente la distancia entre paredes o zonas.

Una vez introducidos los vértices, se selecciona *Insert → Face*, el botón  o pulsando la tecla 'F' y seleccionando los vértices que componen la misma cara uno por uno, se cierra la superficie. Aparece una ventana emergente (Figura 7.3) en la que se pueden modificar diferentes atributos de ésta.

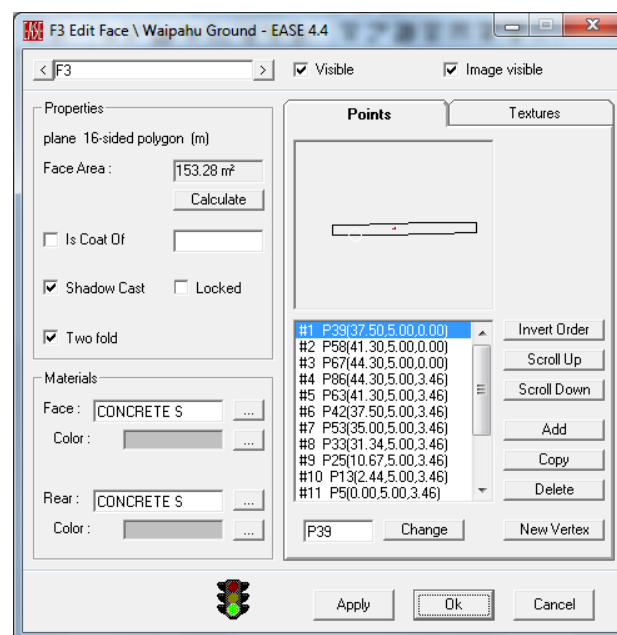




Figura 7.3: Ventana de propiedades de una superficie

En primer lugar se puede introducir el material de la superficie. EASE proporciona la opción *Two fold* si se trata de una superficie que recibirá impactos en ambas caras. En este caso, se podrá seleccionar un material para cada cara de la superficie, lo cual es muy útil si se quiere simular, por ejemplo, una pared con dos acabados diferentes. Debajo de la selección de materiales se podrá elegir también el color que tendrá esta superficie por si se desea más adelante realizar una representación gráfica.


Otra opción que proporciona EASE en las superficies es *Shadow cast*. Seleccionando esta opción en una superficie se tendrá como que es opaca al sonido cuando se realicen las simulaciones. Es muy útil en el caso de paredes en zonas cerradas, ya que se tiene en cuenta que los altavoces de una sala no afectan a las salas adyacentes. Si no se activase o se realizasen simulaciones sin tener en cuenta esta opción, los altavoces de una sala influirían en las otras, obteniendo un mayor nivel del que en realidad se tiene.

Aparte de los vértices y las superficies, otra herramienta de diseño que deja añadir EASE son las líneas. Éstas no influyen en la simulación, pero pueden servir para identificar zonas o tomar referencias. Se incluyen como las superficies, seleccionando vértices ya incluidos. Para ello se selecciona en *Insert* → *Edge*, pulsando el botón  o simplemente con la tecla 'E'. En el caso de la estación serán útiles para introducir los pilares en los que se colocarán los altavoces en Concourse Level.

Tras haber finalizado el diseño de la estación se procede a la ubicación de los altavoces dentro de cada zona. Para ello, se selecciona *Insert* → *Loudspeaker*, el botón  o presionando la tecla 'L'. Al introducir un altavoz en el diseño, aparece una ventana en la que se puede seleccionar el modelo que se desea, sus coordenadas, inclinación y potencia en cada banda de tercio de octava (Figura 7.4).

Por ejemplo, para los modelos de techo, la inclinación será de -90° en vertical. Para el resto, será diferente dependiendo de la ubicación. La potencia se sitúa al máximo para cada altavoz, acción que se hace pulsando el botón *All to max*. Más tarde se realizará la ecualización en cada zona para una correcta respuesta en frecuencia, por lo que de momento interesará que estén al máximo.

Finalizado el diseño de las superficies y la ubicación de los altavoces, se comienza con las áreas de audiencia. Para realizar las simulaciones en EASE es necesario indicar dónde se quieren calcular los valores. Por ello, se ha de incluir un área de audiencia en cada área donde se quiera realizar los cálculos.

Para introducir un área de audiencia en EASE hay que seleccionar *Insert* → *Audience area*, el botón  o directamente presionar la tecla 'A'. A diferencia de las superficies, las áreas de audiencia sólo pueden tener cuatro vértices, los cuales no son necesarios introducir antes. Esto facilita la inclusión de éstas, pero se convierte en un inconveniente al no poder realizar geometrías de más de cuatro puntos. Debido a esto, para evaluar todas las áreas en un proyecto, se deberá introducir más de un área de audiencia, adaptando y ajustando sus dimensiones según convenga. Hay que recordar que todas ellas deben estar a una altura de 1,5 m ó 3 pies, que además de ser la altura a la que se sitúan normalmente es la indicada en los requisitos dados por el cliente.

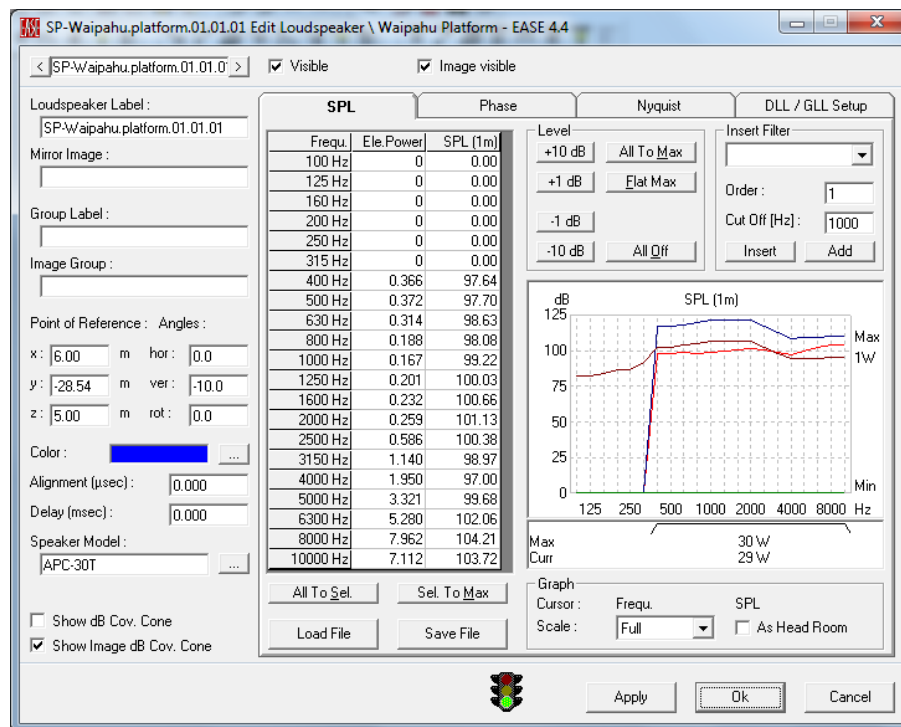



Figura 7.4: Ventana de propiedades de un altavoz.

Otro problema que existe con las áreas de audiencia son los fallos que se producen en las simulaciones al hacer un área de audiencia que corte alguna superficie. En este caso, se producen mínimos de presión sonora y/o inteligibilidad debido a que en las superficies no se consideran niveles de presión. Para evitar este problema, se propone introducir las áreas de audiencia por separado en cada sala independiente, además de ser una ayuda por si más tarde se desea realizar simulaciones en áreas específicas de la zona.

Otra opción de la que dispone EASE es la de *Standard Rendering*, la cual se selecciona desde el botón  en la pantalla principal o en la de edición del proyecto. Desde este módulo se puede visualizar de una forma más gráfica la sala o zona que se ha diseñado anteriormente. Desde el módulo de edición del proyecto se pueden ver tanto las líneas de las caras, como los vértices y altavoces, pero todos ellos se superponen, aportando demasiada información y siendo difícil entender el diseño sin rotarlo.

En cambio, desde *Standard Rendering* se aplican colores a cada superficie del diseño, facilitando su visualización. Estos colores se pueden seleccionar en la ventana de propiedades de cada superficie, pudiendo elegir un mismo color para todas las superficies con el mismo material o seleccionando uno por uno en cada superficie.

Además, en este módulo se pueden realizar también simulaciones, que en contraste con *Area Mapping* o AURA permite rotar la sala y no verlo sólo desde arriba.

Otra ventaja que permite *Standard Rendering* es la de poder seleccionar un área del diseño y poder visualizarlo desde dentro como si se fuese un espectador dentro de la estación. Desde una ventana emergente se puede mover la cámara, así como girarla con el ratón.

Esta opción es muy útil, ya que permite ver el resultado final del diseño, y se puede contemplar la estación de una forma más gráfica y subjetiva. Además, usando este módulo se obtiene una mayor facilidad a la hora de buscar fallos en el diseño, como la posición de los altavoces o paredes y techos sin cerrar.

A continuación se muestran los diseños realizados de cada una de las partes de la estación así como su representación mediante *Standard Rendering*.

7.2.1. Ground Level

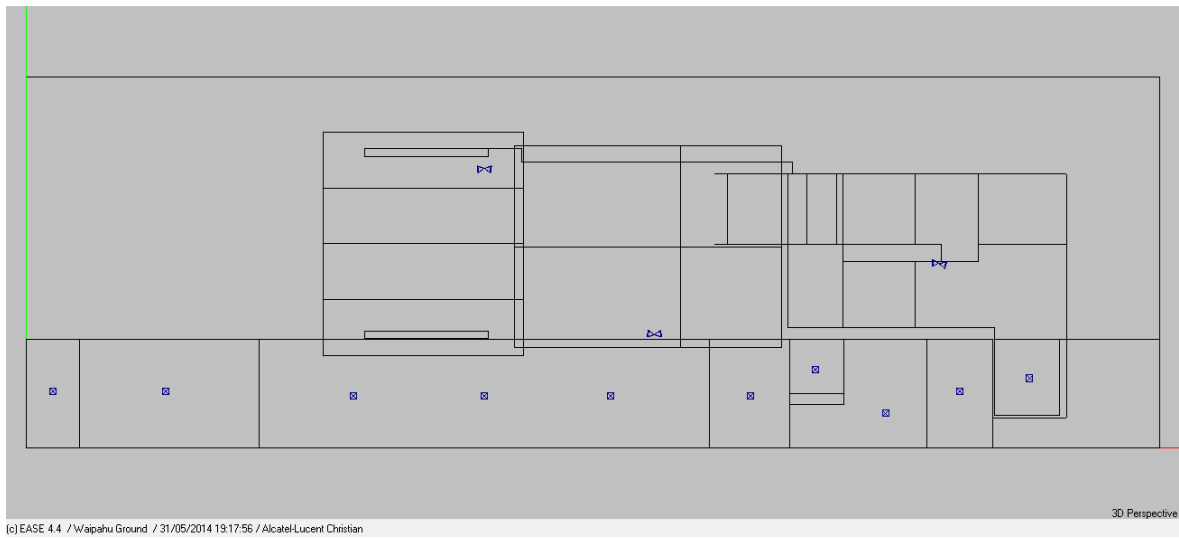


Figura 7.5: Vista en planta de Ground Level

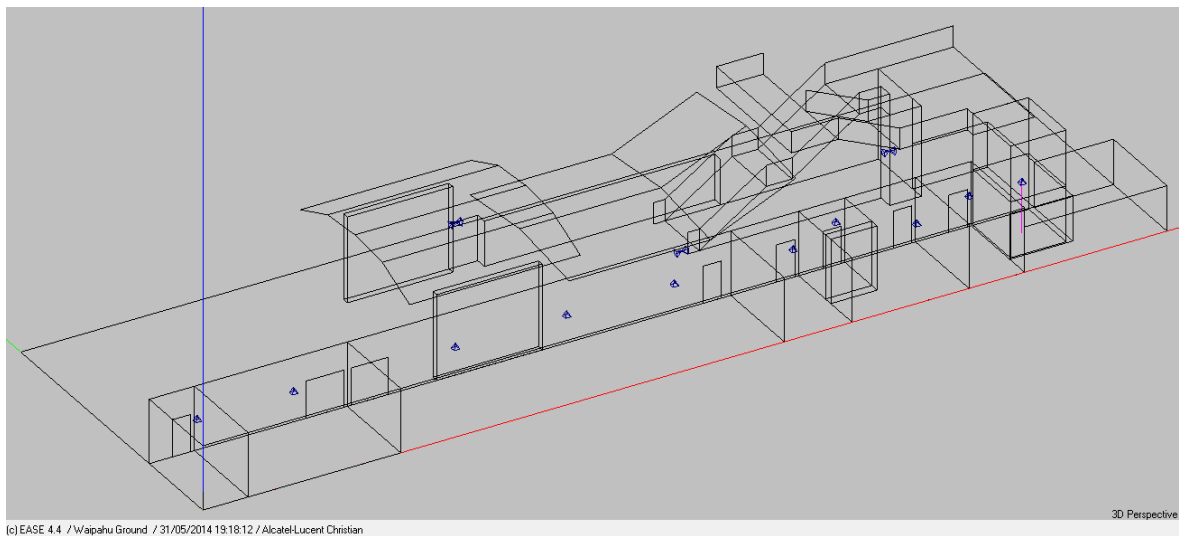


Figura 7.6: Vista 3D de Ground Level

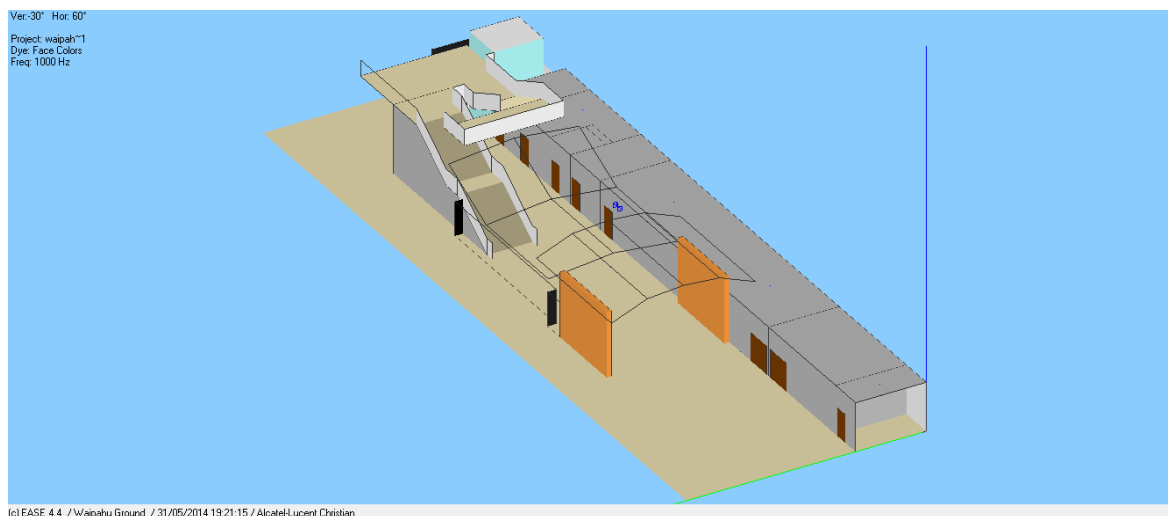


Figura 7.7: Standard Rendering con las caras tintadas de Ground Level

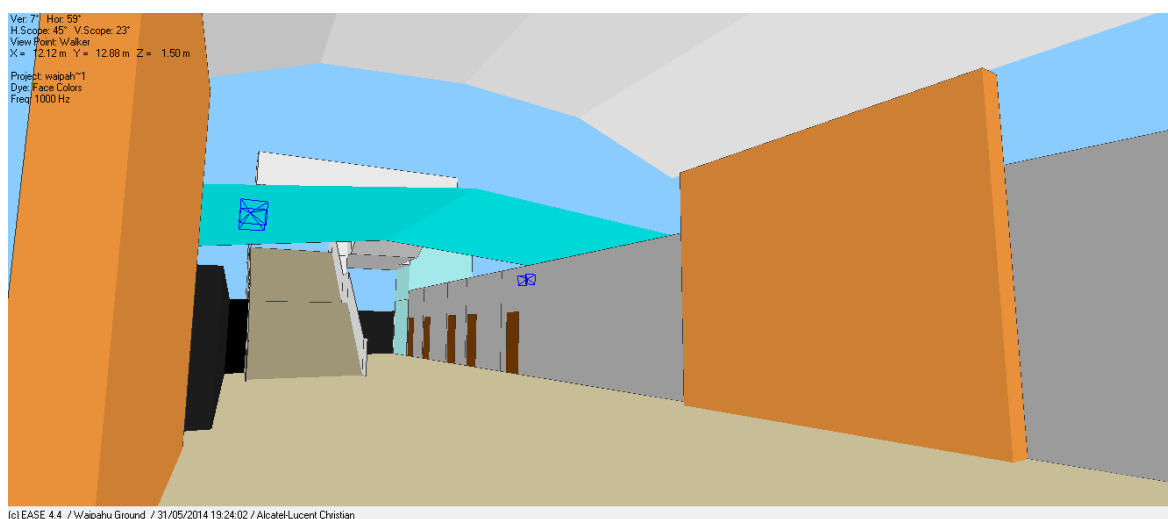


Figura 7.8: Standard Rendering desde el interior de Ground Level

7.2.2. Concourse Level

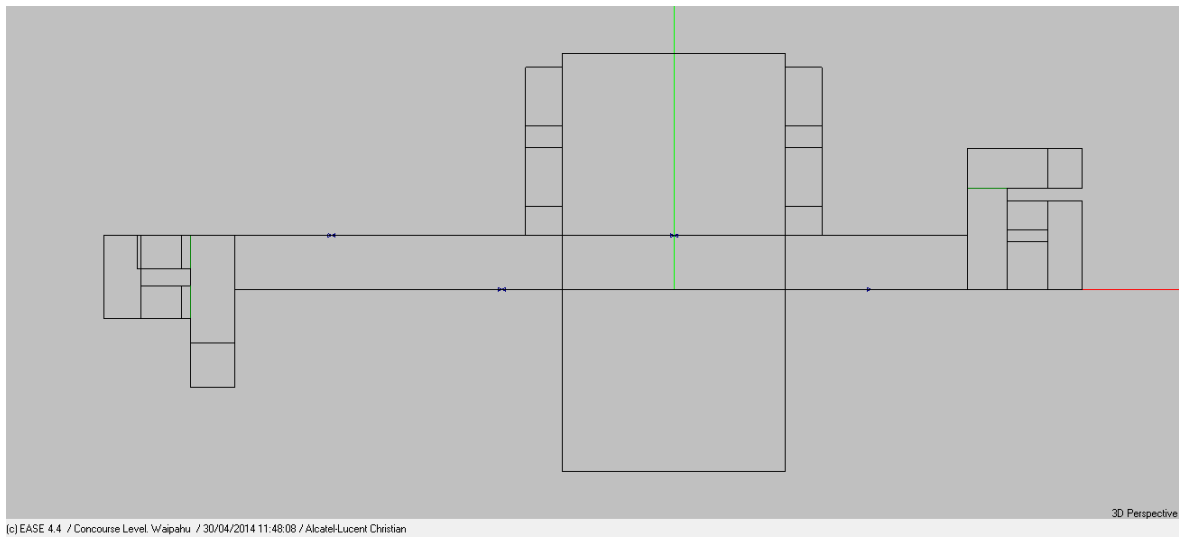


Figura 7.9: Vista en planta de Concourse Level

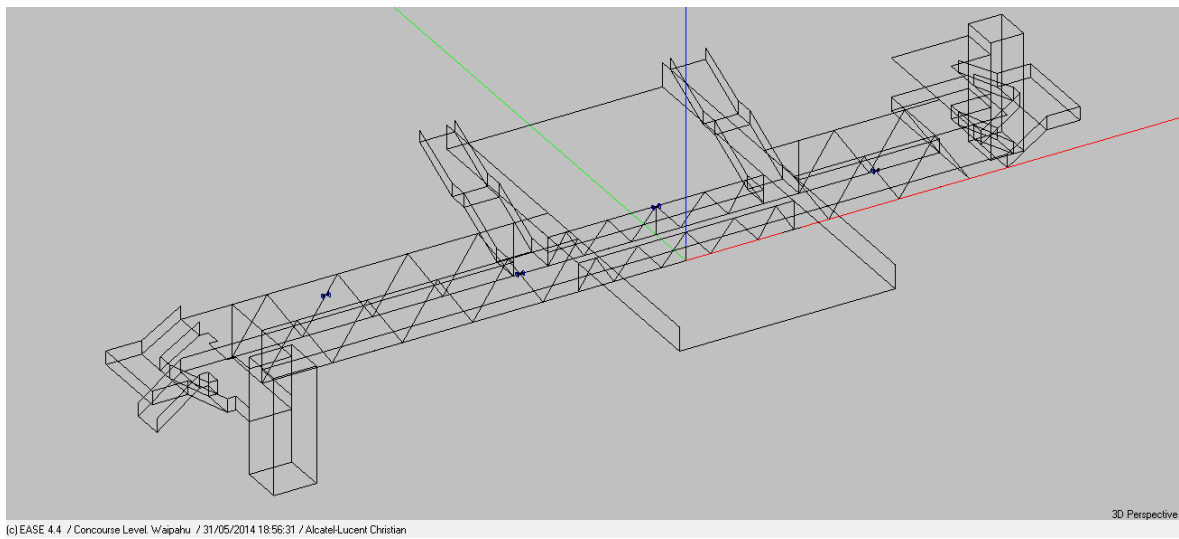


Figura 7.10: Vista 3D de Concourse Level

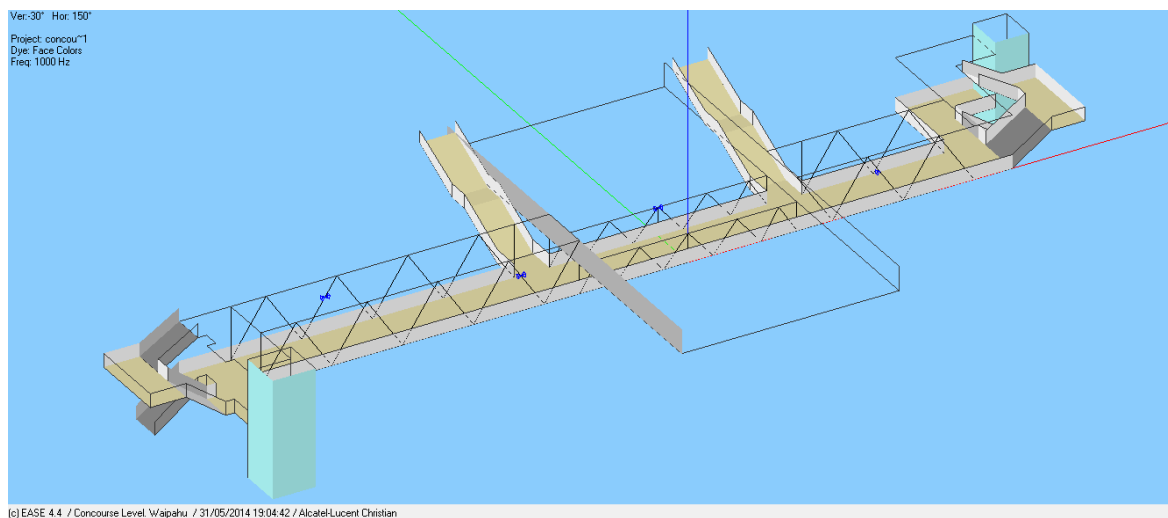


Figura 7.11: Standard Rendering con las superficies tintadas de Concourse Level

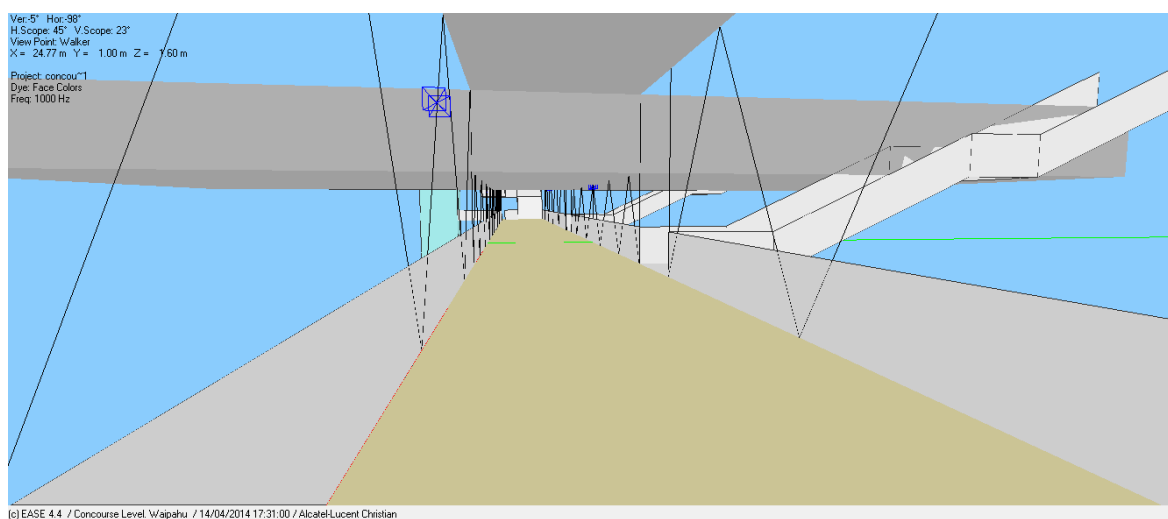


Figura 7.12: Standard Rendering desde el interior de Concourse Level

7.2.3. Platform Level

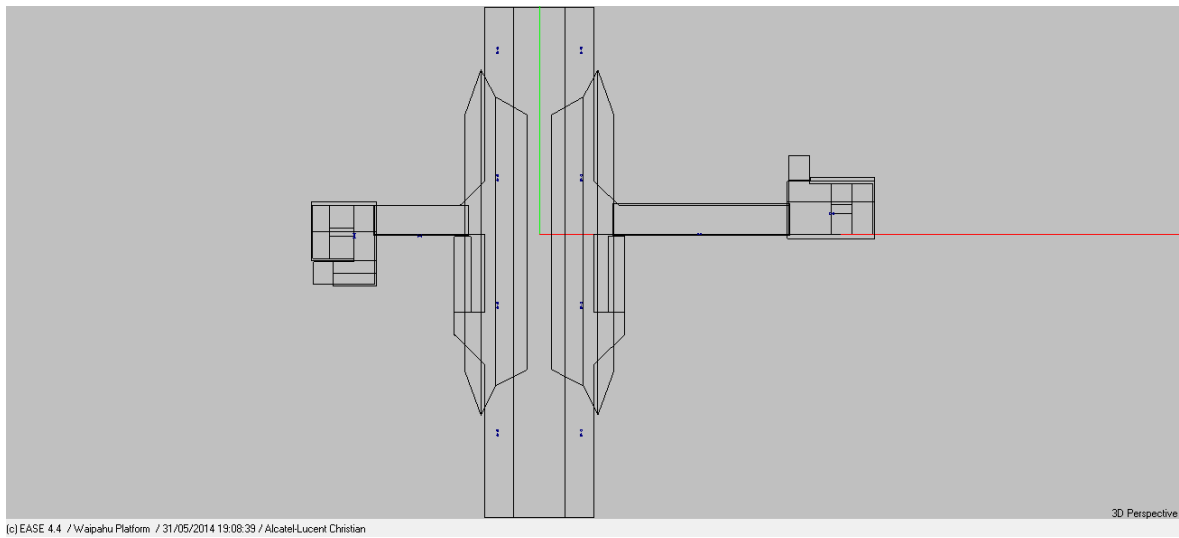


Figura 7.13: Vista en planta de Platform Level

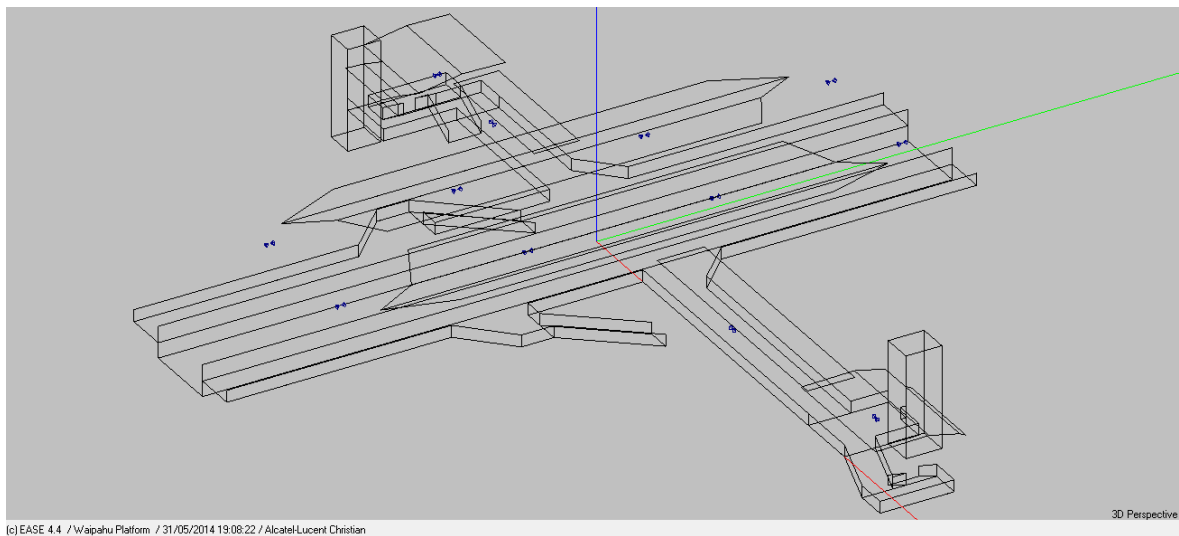


Figura 7.14: Vista 3D de Platform Level

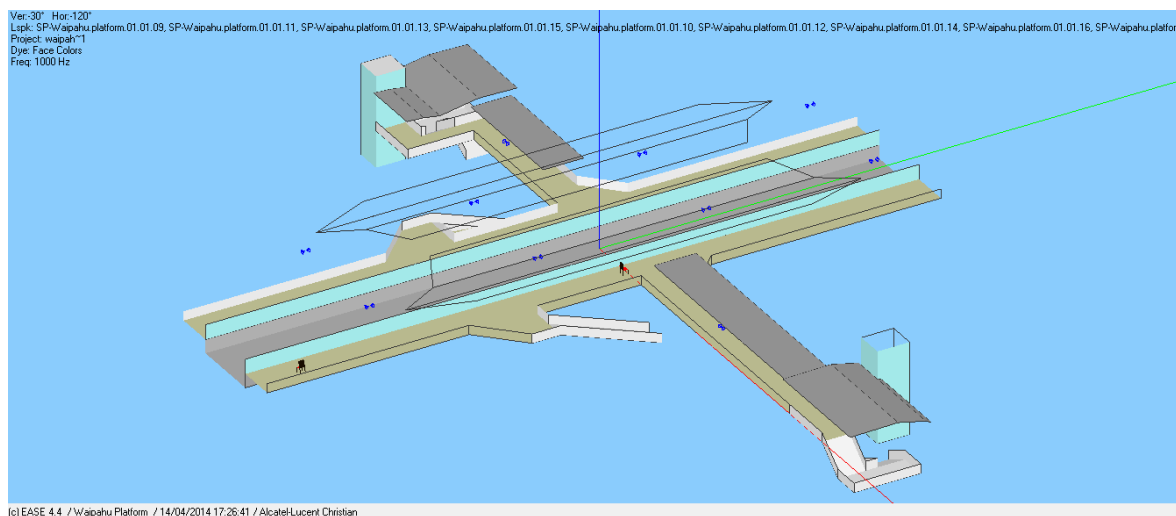


Figura 7.15: Standard Rendering con las superficies tintadas de Platform Level

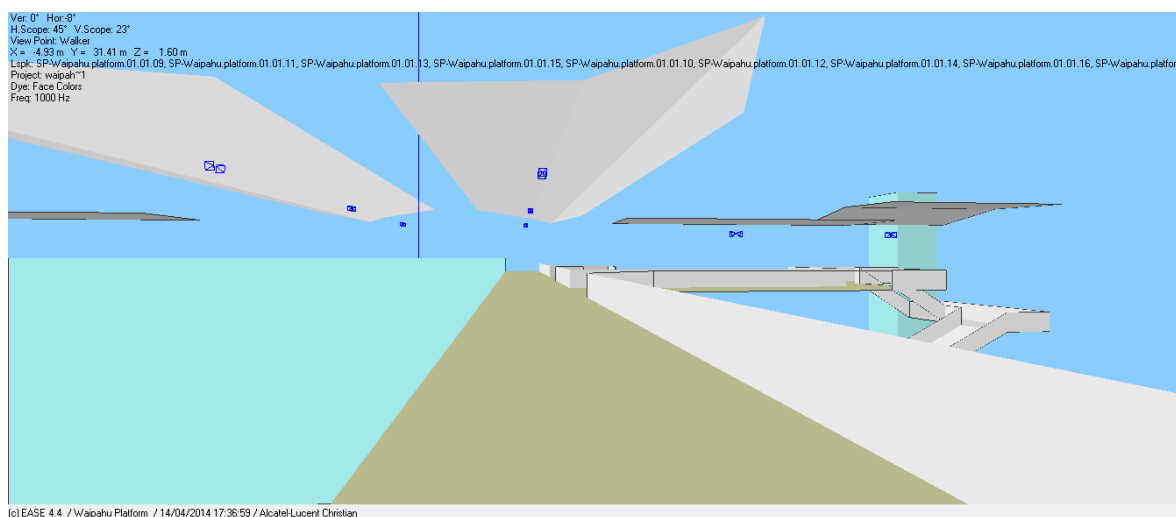


Figura 7.16: Standard Rendering desde el interior de Platform Level

7.3. Tiempo de reverberación y volumen equivalente

Realizar simulaciones de un recinto abierto en EASE no es habitual.

Para obtener mapas en recintos cerrados no hay que realizar demasiados cálculos. Simplemente se ha de deseleccionar en *Edit → Room Data* la opción *Room Open*. Con esto se indicará a EASE que se está trabajando con una sala cerrada. Al seleccionar esta opción, EASE calcula directamente el volumen y la superficie de la sala, y con éste, el tiempo de reverberación mediante la fórmula de Eyring o Sabine, según se indique. Finalmente, mediante el método *Standard Mapping*, *Standard Mapping with Reflections* o AURA se obtendrán los parámetros deseados, con mayor o menor resolución dependiendo del método utilizado.

En cambio, al tratarse este proyecto de un recinto abierto, las cosas se complican. En primer lugar, no se puede deseleccionar la opción de *Room Open*: para saber si la sala está cerrada, EASE calcula la integral de todas las superficies; si no es 0, se considera abierta. A partir de este punto comienzan los problemas.

Para los cálculos de parámetros mediante *Standard Mapping*, EASE usa la acústica estadística, para lo cual necesita saber el volumen del recinto con el que calcula el tiempo de reverberación y la absorción.

Como este recinto no se puede cerrar por su forma, hay que mantenerlo abierto y no existe ningún volumen.

A pesar de esto, existe la opción de introducirlo a mano. Lo que se hace es "inventar un volumen" compatible con el tiempo de reverberación y con la absorción total mediante la fórmula de Eyring, para que, manteniendo el recinto abierto, los cálculos de niveles estadísticos sean correctos.

Pero, ¿qué tiempo de reverberación hay en la sala?

Aquí ya se puede empezar a apreciar el problema que se presenta. Una sencilla solución sería ir al lugar que se quiere sonorizar y medir el tiempo de reverberación con el equipo necesario. Como ya se ha dicho, la estación aún en fase de diseño, por lo que esta opción no es posible. Una solución factible es estimar el tiempo de reverberación por su respuesta al impulso. Ésta se puede calcular mediante dos métodos:

- Utilizando el módulo AURA.
- Mediante trazado de rayos o *Ray Tracing*.

En primer lugar, el módulo AURA de EASE está diseñado para realizar cálculos más precisos y complejos que los realizados mediante los métodos normales. Aunque la mayoría de estos cálculos se realizan mediante trazado de rayos, es necesario que la sala esté cerrada para calcular el final de la respuesta temporal mediante Teoría Estadística.

Por esta razón, esta opción no es válida para la estación, ya que, como se ha dicho, toda la estación está abierta y no se puede deseleccionar la opción de *Room Open*.

La segunda opción, mediante trazado de rayos o *Ray Tracing*, se puede utilizar sin problemas con un recinto abierto. Por esta razón será la opción utilizada.

Este método emite una cantidad de rayos por cada altavoz de la sala, y calcula tanto las reflexiones en las superficies como la atenuación producida por los materiales y el aire. Se puede modificar tanto el número de rayos por altavoz como el orden de reflexiones que se desea tener en cuenta. Claramente, cuanto mayor sean estos valores, mayor será el tiempo de computación.

Se puede acceder al método *Ray Tracing* desde la ventana principal en *Calculations* → *Ray Tracing*. El problema que surge al realizarse desde aquí es que se realizan cálculos en todo el recinto. Esta opción es útil para encontrar puntos en los que se produzcan reflexiones indeseadas o poder apuntar los altavoces para conseguir mayor cobertura en determinadas zonas. En cambio, para poder hallar el tiempo de reverberación, se ha de calcular en puntos independientes, por lo que ha de realizarse desde *Area Mapping*.

Desde esta ventana se accede a *Tools* → *Local Ray Tracing* y seleccionando el punto de la sala donde se quiera calcular aparecerá una ventana emergente. En ésta se pueden seleccionar los altavoces con los que se quiere realizar el cálculo, el número de rayos por altavoz, el orden de las reflexiones y el método a utilizar, en este caso *Ray Tracing Impacts* (Figura 7.17). Para asegurar que se va a obtener un resultado preciso, se recomienda modificar estos valores para que la oportunidad de impacto o *Impact Chance* sea mayor de 90%.

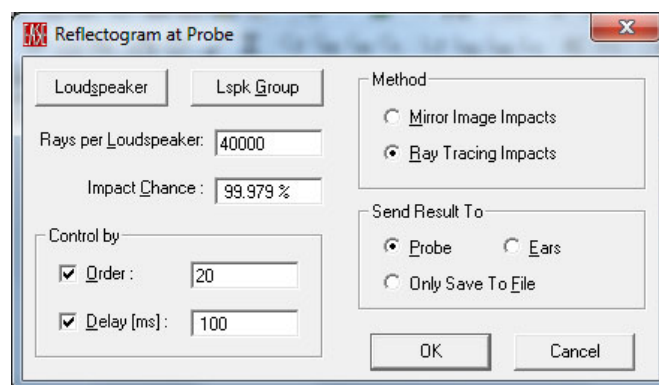


Figura 7.17: Ventana de opciones al seleccionar *Local Ray Tracing* en un punto

Una vez realizados los cálculos por parte del programa, aparecerá una ventana emergente con los resultados. En ésta se puede visualizar el reflectograma, espectro en frecuencia, curva MTF y más opciones.

Llegados a este punto, ya se podrá comprobar el tiempo de reverberación calculado desde *Modify* → *Reverberation Time*. Aquí se presenta otra incógnita, ya que aparecen distintos tiempos de reverberación calculados por diferentes métodos: Eyring, Sabine y Schröder. La pregunta es: ¿cuál de ellos usar?

Las fórmulas de Eyring y Sabine se utilizan en Teoría Estadística e indican el tiempo de reverberación de una sala en función a su volumen, superficie y materiales. Esto implica que no se tendrán en cuenta el número de altavoces utilizados ni su posición en el recinto, así como su respuesta en frecuencia.

En cambio, mediante Schröder, se tienen en cuenta los altavoces utilizados, ya que, obviamente, estos alargarán la respuesta temporal de la sala. A su vez, el tiempo de reverberación existirá sólo en aquellas frecuencias en las que emitan los altavoces. En la Figura 7.18 se puede observar la comparación entre estos tres métodos para Platform Level. Claramente se aprecia cómo utilizando altavoces que no emiten hasta 400 Hz, el tiempo de reverberación mediante Sabine o Eyring sí dan valores en estas frecuencias, pero mediante Schröder no. Debido a estas razones, se utilizará el tiempo de reverberación por Schröder.

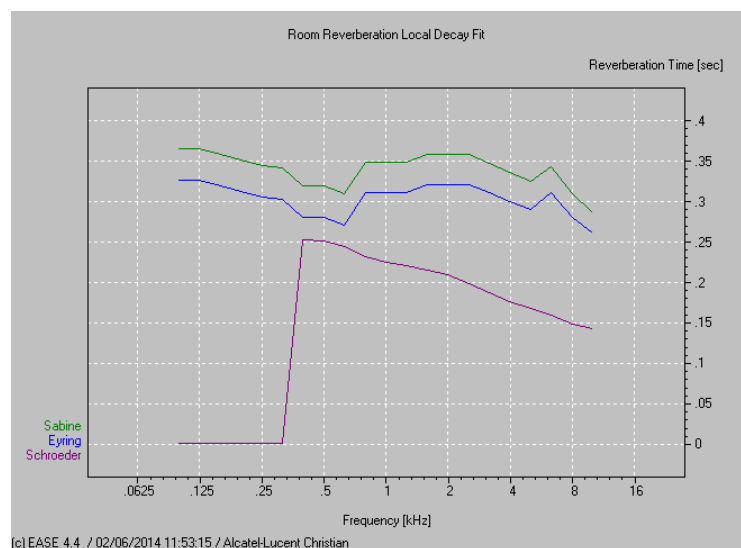


Figura 7.18: Tiempo de reverberación por Eyring, Sabine y Schröder

Para obtener una estimación del tiempo de reverberación en cada nivel de la estación, se deberá hallar el tiempo de reverberación en 5 puntos y calcular la media de éstos. De esta forma se obtendrá un valor aproximado al real, aunque hay que destacar que tendrá variaciones en función del tamaño del recinto y de las propiedades de éste. En la Tabla 2 se muestra un ejemplo con los resultados de los resultados para Platform Level.

Tabla 2: Tiempo de reverberación en 5 puntos y su media en Platform level

Frecuencia (Hz)	TR60 Punto 1 (s)	TR60 Punto 2 (s)	TR60 Punto 3 (s)	TR60 Punto 4 (s)	TR60 Punto 5 (s)	Average (s)
100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
125	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
160	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
315	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
400	0,25	0,33	0,21	0,28	0,32	0,28
500	0,28	0,31	0,2	0,27	0,33	0,28
630	0,28	0,3	0,18	0,26	0,32	0,27
800	0,27	0,35	0,17	0,43	0,32	0,31
1000	0,26	0,34	0,17	0,44	0,32	0,31
1250	0,27	0,35	0,16	0,46	0,31	0,31
1600	0,27	0,36	0,16	0,49	0,3	0,32
2000	0,27	0,37	0,16	0,51	0,3	0,32
2500	0,25	0,38	0,16	0,52	0,27	0,32
3150	0,23	0,39	0,15	0,51	0,25	0,31
4000	0,21	0,38	0,18	0,49	0,23	0,30
5000	0,21	0,38	0,18	0,48	0,22	0,29
6300	0,2	0,44	0,17	0,52	0,21	0,31
8000	0,19	0,41	0,16	0,47	0,19	0,28
10000	0,2	0,37	0,15	0,41	0,18	0,26

Esta media de cada zona de la estación se introduce en *Edit → Room Data*, en la pestaña *Room RT*. Se deberá seleccionar la opción *Lock* para bloquearlo y evitar que EASE lo recalculé.

En este punto aparece un nuevo problema, ya que EASE recalcula el volumen de la sala, el tiempo de reverberación y el coeficiente de absorción medio, unos en función de los otros.

Si no se ha introducido un tiempo de reverberación, EASE lo calcula mediante la fórmula de Eyring utilizando el volumen introducido y el coeficiente de absorción medio de los materiales introducidos. Pero, si se introduce el tiempo de reverberación y se bloquea, EASE recalcula el coeficiente de absorción medio de la sala, al igual que en el caso anterior, con la fórmula de Eyring.

$$T_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{a})}$$

Ya se ha obtenido el tiempo de reverberación, y el coeficiente de absorción medio y la superficie eficaz los proporciona EASE. Por lo tanto, se puede despejar el volumen en la fórmula sustituyendo el resto de valores. Este volumen corresponderá con el “volumen equivalente” de la sala abierta, que nos proporcionará el coeficiente de absorción medio correspondiente con la sala que se quiere sonorizar.

Para realizar este cálculo se puede utilizar el valor de tiempo de reverberación y de coeficiente de absorción medio de cualquier frecuencia, aunque se recomienda utilizar el más restrictivo debido al error introducido por la falta de decimales en EASE.

Un ejemplo de los cálculos realizados en Ground Level para algunas frecuencias se muestra en Tabla 3. En ésta se puede apreciar claramente como existe una variación entre el volumen resultante. Por esta razón, en este proyecto se ha realizado una media entre los volúmenes obtenidos para cada frecuencia como resultado a utilizar.

Tabla 3: Cálculo del volumen equivalente para Ground Level


Frecuencia	TR60	Coef. Abs	Superficie Eficaz	Volumen
1250 Hz	0,35	0,10	3030,15	701,9
2000 Hz	0,33	0,10	3030,15	658,3
4000 Hz	0,31	0,11	3030,15	679,9
8000 Hz	0,25	0,11	3030,15	557,0

De esta forma, una vez calculado se introduce el valor del volumen en *Edit* → *Room Data* y ya se podrá proceder al cálculo de los parámetros como nivel de presión sonora directo, total e inteligibilidad.

Hasta este punto se ha podido apreciar la problemática que surge en EASE al realizar recintos que no están cerrados. Aún así, la mayoría de estos problemas no son perceptibles a no ser que se indague con más detalle en el programa. A primera vista parece tan sencillo como realizar el diseño, colocar los altavoces y áreas de audiencia, y ya se pueden obtener los resultados. Pero como se ha demostrado, no es así de sencillo, ya que la mayor parte de los parámetros que se quieren calcular necesitan el tiempo de reverberación. Por ejemplo, el nivel de presión sonora total, que en primera instancia no parece verse afectado por si el proyecto está cerrado o no, se verá afectado por el campo reverberante, como ya se ha visto.

7.4. SPL directo

Un primer estudio de la disposición de los altavoces se puede realizar mediante el nivel de presión sonora directo. Este nivel es el correspondiente al campo directo, en el que tan solo se recibe la señal directa de los altavoces. Es útil para poder encontrar puntos en los que se produzcan mínimos de presión en una frecuencia debido a interferencias destructivas entre altavoces.

Se evaluará el nivel directo para la banda de tercio de octava de 1 kHz. Para ello, se selecciona el botón  para acceder a Area Mapping. En esta ventana se pueden realizar cálculos de distintos parámetros, tanto de niveles como de inteligibilidad. También se pueden seleccionar diferentes precisiones, dependiendo del tipo de mapa que se elija. El más simplificado es *Standard Mapping*, con el que se pueden realizar cálculos rápidos. Si se desea hacer un cálculo más preciso en el que se tengan en cuenta las reflexiones, se puede utilizar *Standard Mapping with Reflections*.

También, como se ha dicho anteriormente, existe el módulo AURA, que no está incluido en la versión estándar de EASE. Este módulo realiza simulaciones más precisas que el resto de métodos. Claramente, al obtener mayor precisión, los cálculos realizados para este mapa consumen más tiempo que en los casos anteriores.

Al tratarse de nivel directo, no hará falta realizar cálculos con reflexiones, por lo que con el método *Standard Mapping* será suficiente. Se deberá tener en cuenta la resolución con la que se dibujará el mapa, ya que los puntos intermedios se calculan por interpolación. Esto puede dar lugar a representaciones de mapas incorrectas, por lo que se utilizará una resolución de 1.

Una vez hallado el mapa de nivel directo, aparecerá una nueva ventana emergente en la que se puede modificar las frecuencias en las que se quiere representar el mapa, ver la distribución de niveles o la respuesta en frecuencia, entre otras opciones.

Seleccionada la pestaña de *Frequency response*, se puede ver una primera aproximación de la respuesta en frecuencia que se tiene en este momento en la sala. En esta pestaña se permite representar la respuesta en frecuencia en un punto concreto, la máxima de toda la sala, la mínima y la media.

Todas estas imágenes se pueden copiar, así como los valores de la distribución de niveles y respuesta en frecuencia. A continuación se muestran los resultados para cada zona de la estación.

7.4.1. Ground Level

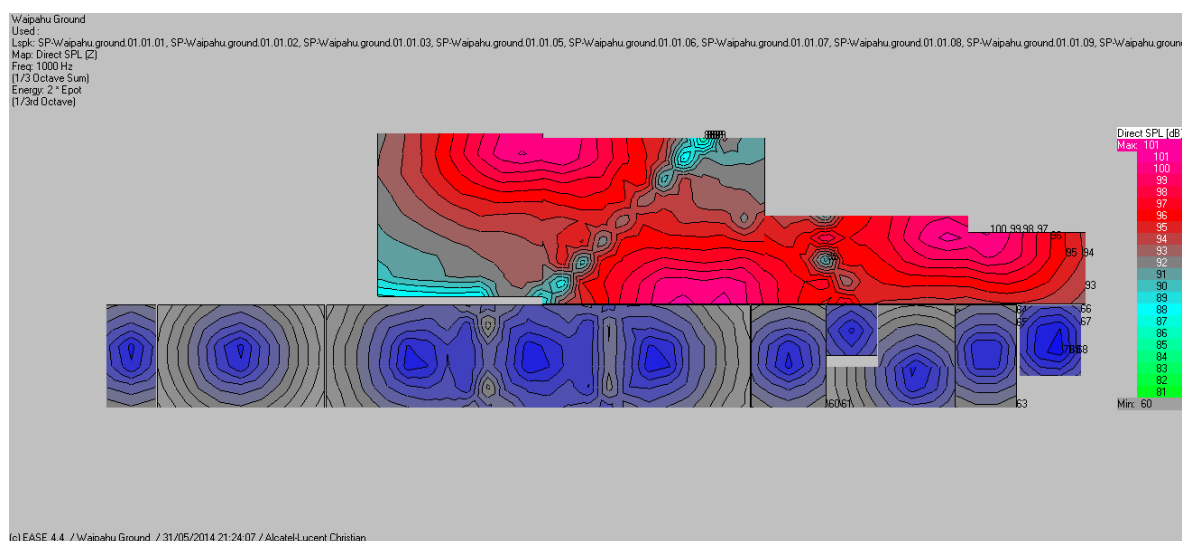


Figura 7.19: Area Mapping de SPL Directo en Ground level para el tercio de octava de 1 kHz

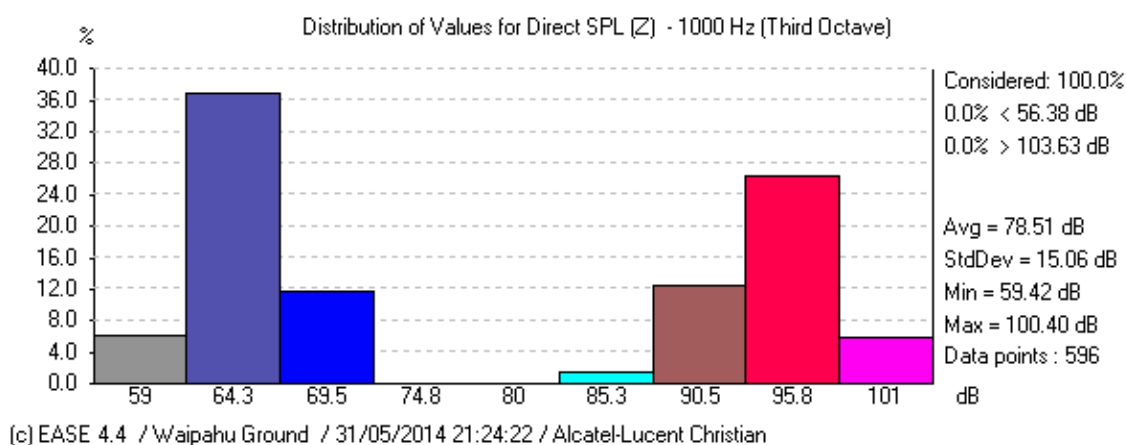


Figura 7.20: Distribución de SPL Directo en Ground level para el tercio de octava de 1 kHz

7.4.2. Concourse Level

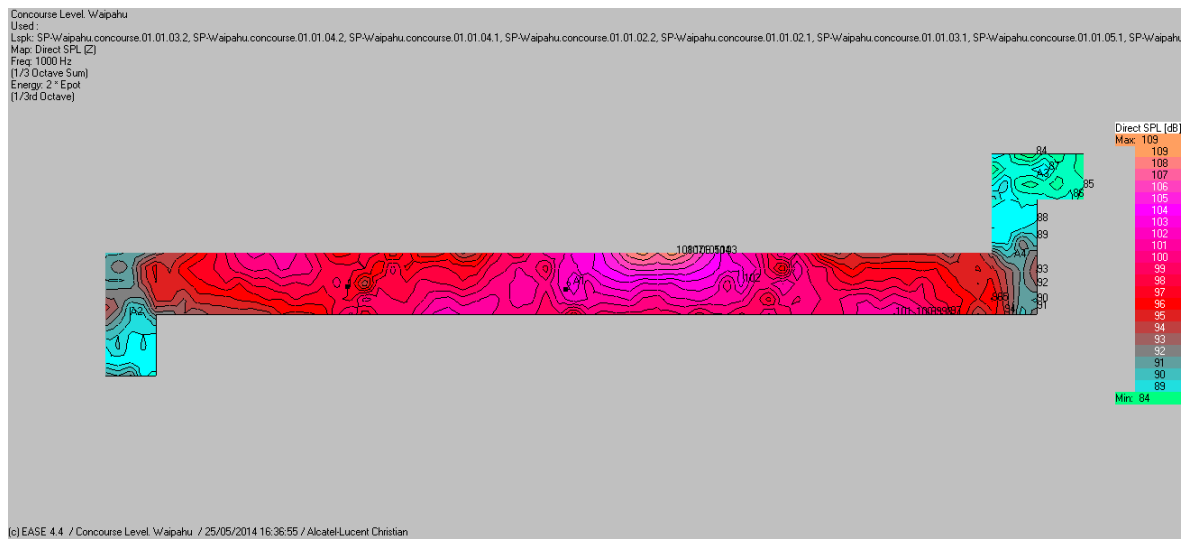


Figura 7.21: Area Mapping de SPL Directo en Concourse level en el tercio de octava de 1 kHz

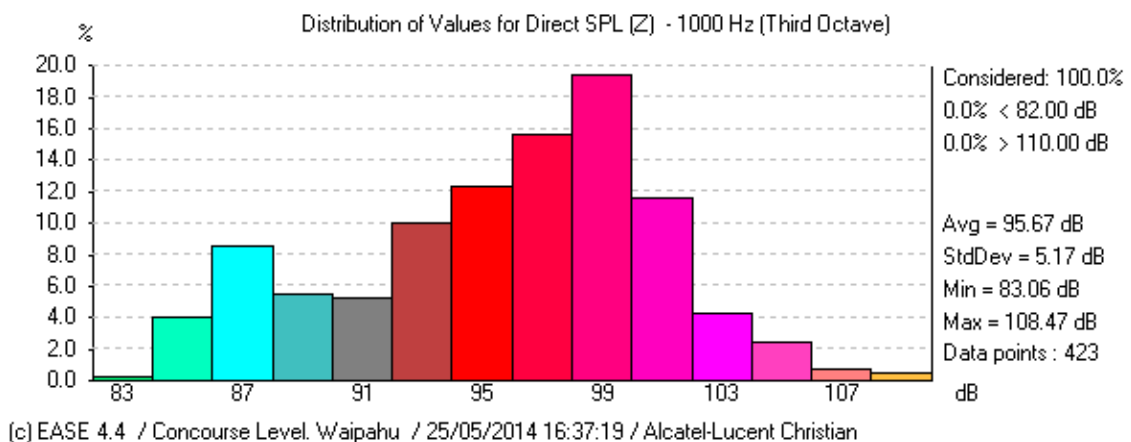


Figura 7.22: Distribución de SPL Directo en Concourse level en el tercio de octava de 1 kHz

7.4.3. Platform Level

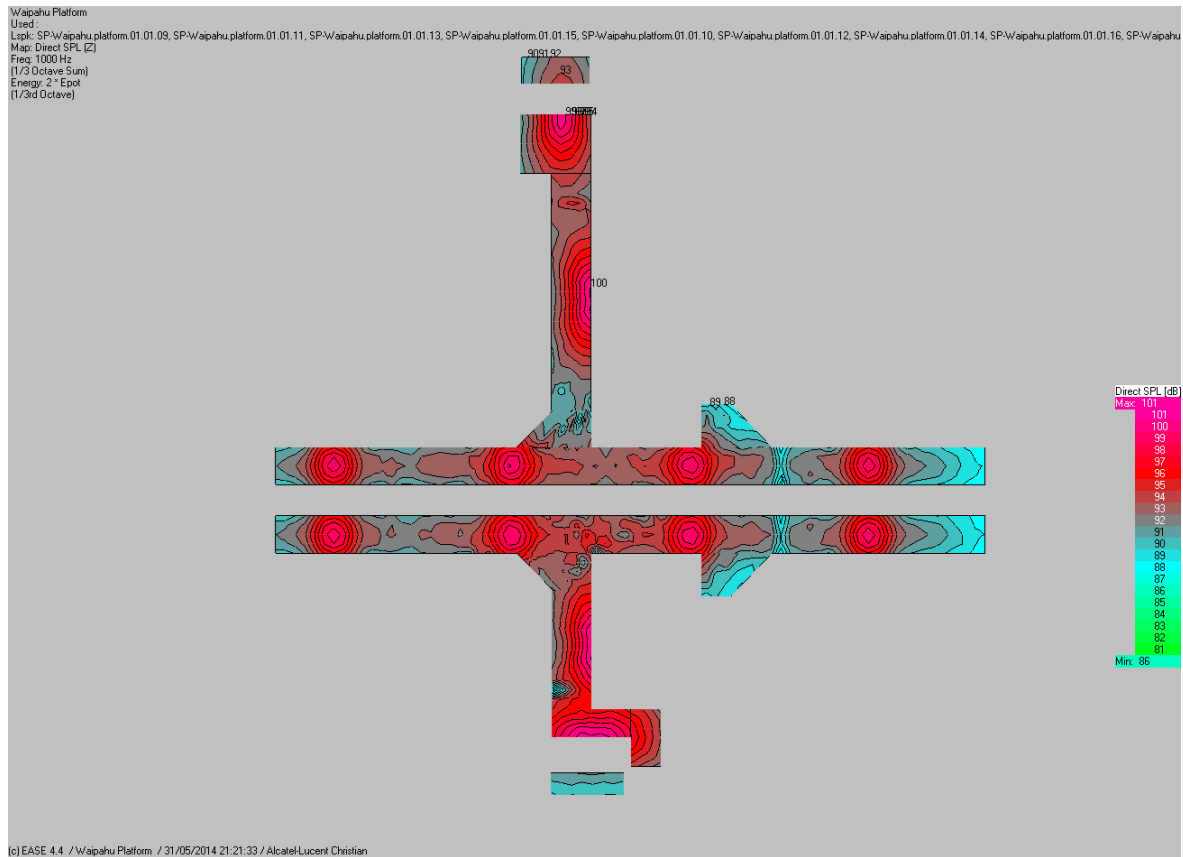


Figura 7.23: Area Mapping de SPL Directo en Platform level para el tercio de octava de 1 kHz

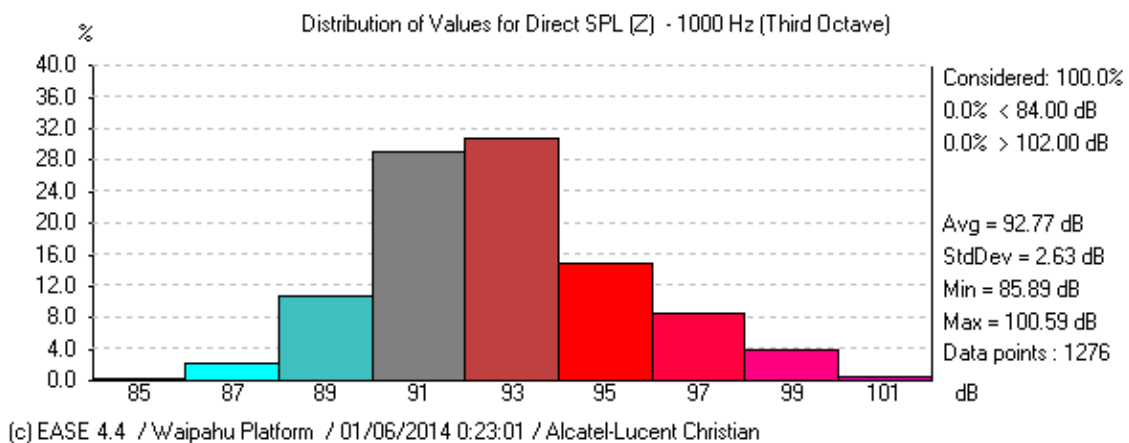


Figura 7.24: Distribución de SPL Directo en Platform level para el tercio de octava de 1 kHz

7.5. SPL total

El nivel directo proporciona un primer estudio en el que observar posibles cancelaciones, aunque para realizar un estudio más preciso se ha de calcular el nivel total. Éste es producido por la suma de las señales directas y reflejadas. Se representará en banda ancha y dBA, es decir, decibelios ponderados mediante la curva A, para poder comparar éste con el nivel de ruido proporcionado.

El nivel directo se ha calculado mediante *Standard Mapping*, ya que no se tienen en cuenta la reflexiones, pero para un estudio más preciso del nivel total se utilizará *Standard Mapping with Reflections*. Para ello, se selecciona en el menú *Mapping* → *Standard with Reflections*, donde aparecerá una ventana emergente (Figura 7.25). Desde ésta se puede seleccionar, entre otras:

- El parámetro que se desea calcular (SPL directo, SPL Total, STI,...).
- La frecuencia en la que se quiere calcular.
- Los altavoces o grupo de altavoces que se desean utilizar
- La resolución del mapa, en este caso 1.
- Áreas de audiencia en los que se quiere realizar los cálculos.
- Nivel de ruido, que servirá para calcular el STI más adelante.
- Si se desea tener en cuenta las superficies opacas al ruido (*Map with Shadow*).

Para el cálculo del nivel total se seleccionará *Map with Shadow* en el caso de la zona cerrada de Ground level, ya que los altavoces de unas salas no afectarán a las contiguas. En cuanto al resto de opciones, se dejarán como están.

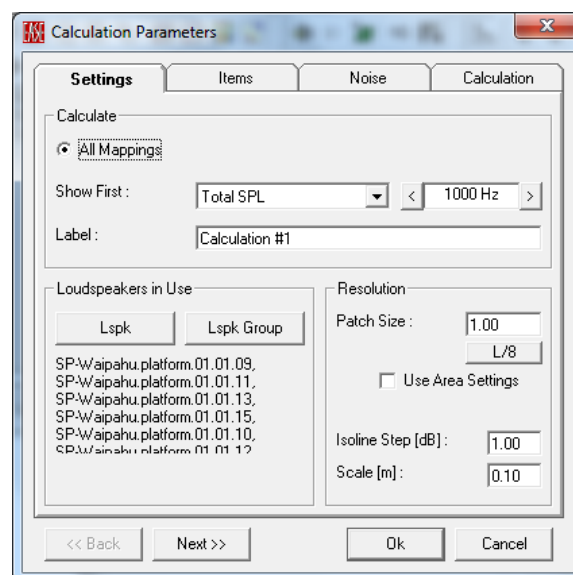


Figura 7.25: Ventana de opciones de *Standard Mapping with Reflections*

Tras aceptar, aparecerá una nueva ventana, igual que la que surge en *Local Ray Tracing*. Para poder hallar un mapa con una resolución necesaria, se recomienda utilizar los mismos parámetros que en el otro caso. De esta forma, se tendrá una oportunidad de impacto mayor de un 90%.

El mayor problema que hay con este tipo de mapa es que, aun teniendo una buena resolución, el tiempo de cálculo es muy alto: los cálculos para cada zona de la estación tardan aproximadamente 4 horas. Puede resultar tedioso si no se han seleccionado los altavoces correctamente, o si se produce algún fallo del programa, por lo que se recomienda utilizarse solamente en la simulación final. Para realizar el resto de mapas durante la colocación de altavoces se recomienda utilizar *Standard Mapping*.

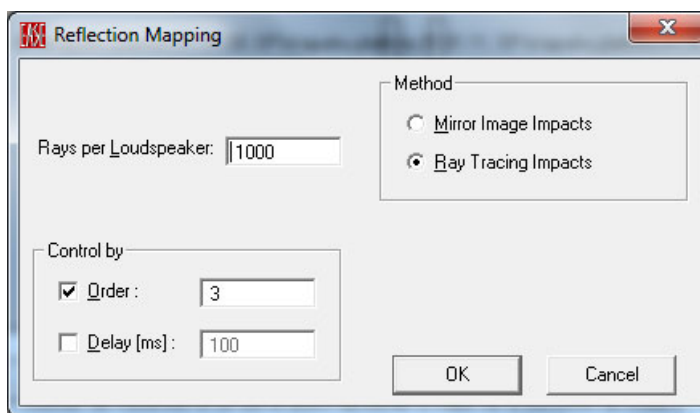


Figura 7.26: Ventana de opciones de *Standard Mapping with Reflections*

Si ya se ha realizado una simulación anteriormente, no es necesario rehacerla para calcular otro parámetro, ya que EASE los calcula todos al realizar la simulación. Por ello, pulsando el botón Σ o seleccionando Total SPL se podrá representar directamente. Esta opción es útil, ya que ahorra tiempo de cálculo y permite hallar todos los parámetros necesarios y sus mapas realizando tan solo una simulación.

A continuación se muestran los resultados para cada nivel de la estación. El nivel inferior de la estación se ha simulado por separado, ya que en las salas de mantenimiento no ha sido necesario realizar los cálculos de tiempo de reverberación y volumen equivalente por estar cerradas.

7.5.1. Ground Level

Zona abierta

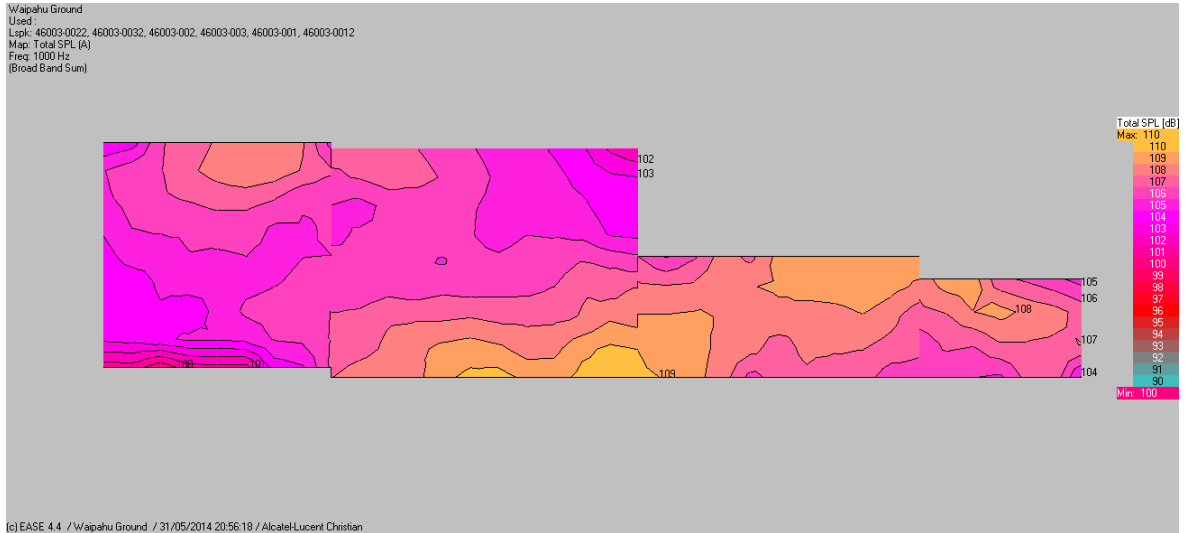


Figura 7.27: Area Mapping de SPL Total en el área abierta de Ground level

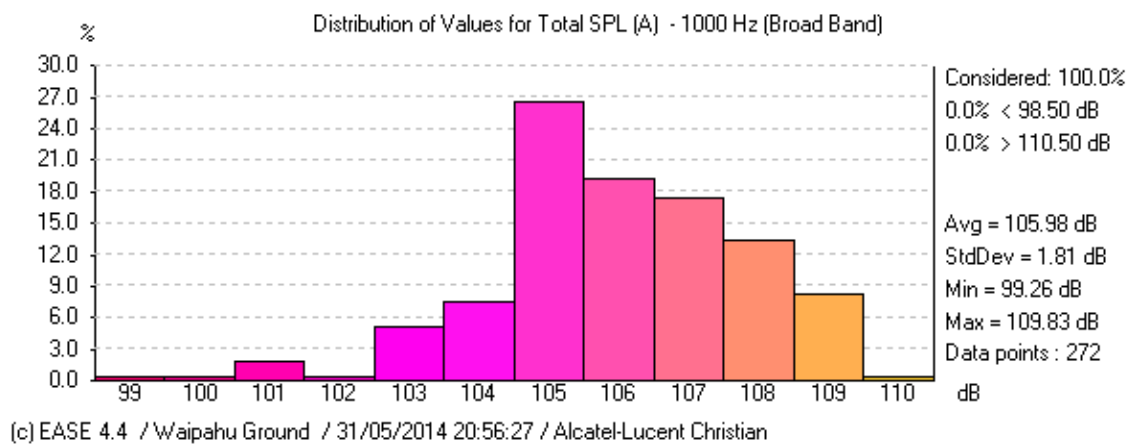


Figura 7.28: Distribución de SPL Total en el área abierta de Ground level

Zona cerrada

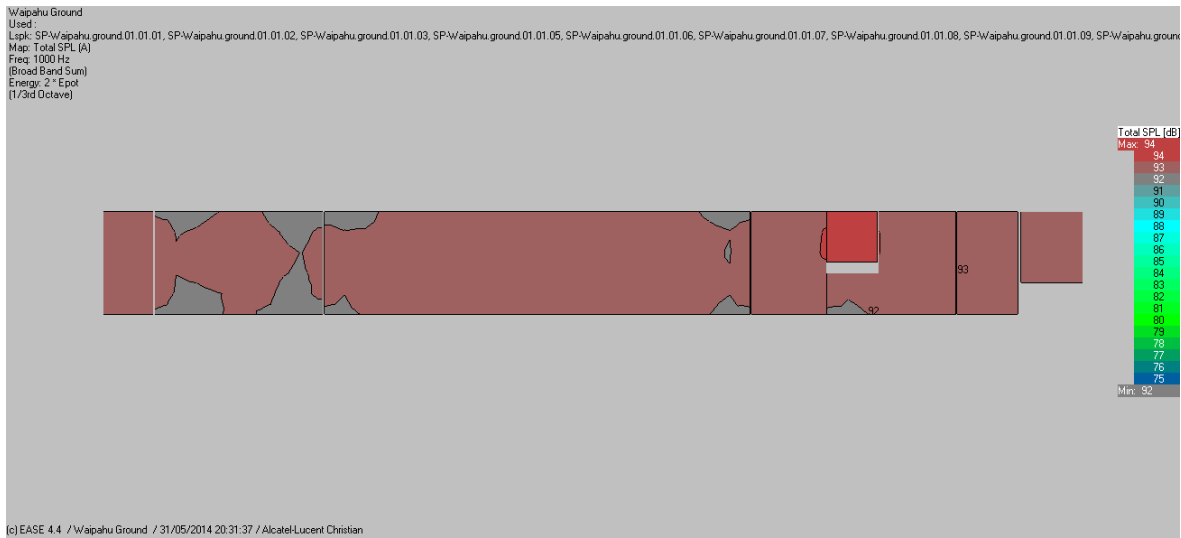


Figura 7.29: Area Mapping de SPL Total en el área cerrada de Ground level

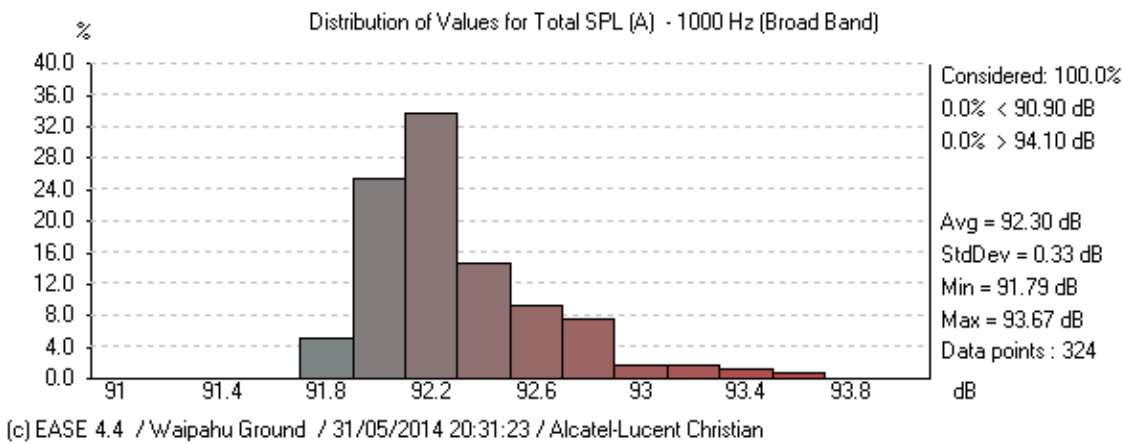


Figura 7.30: Distribución de SPL Total en el área cerrada de Ground level

7.5.2. Concourse Level

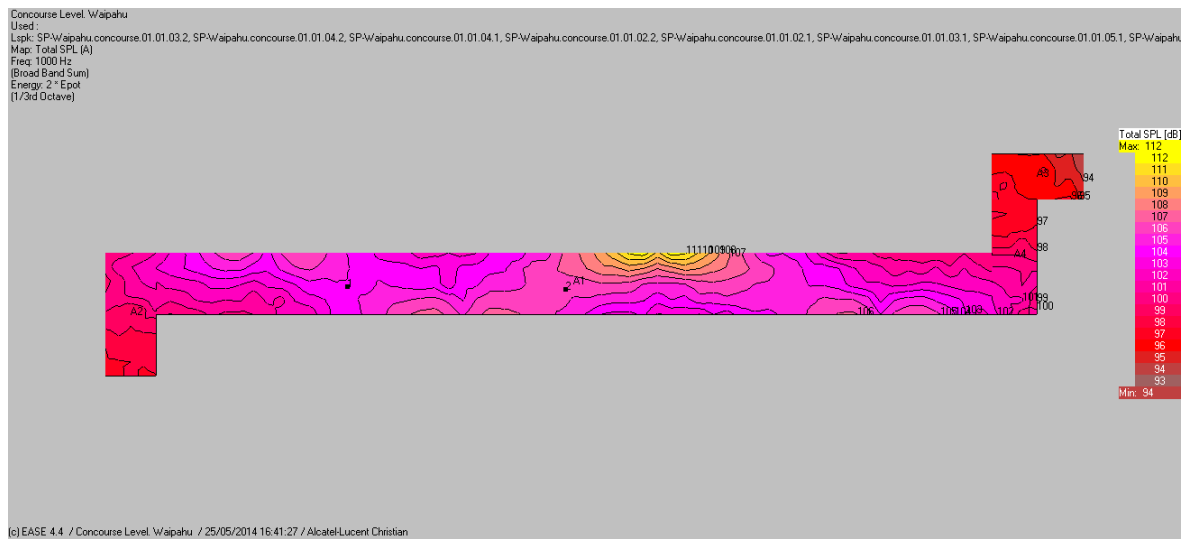


Figura 7.31: Area Mapping de SPL Total en Concourse level

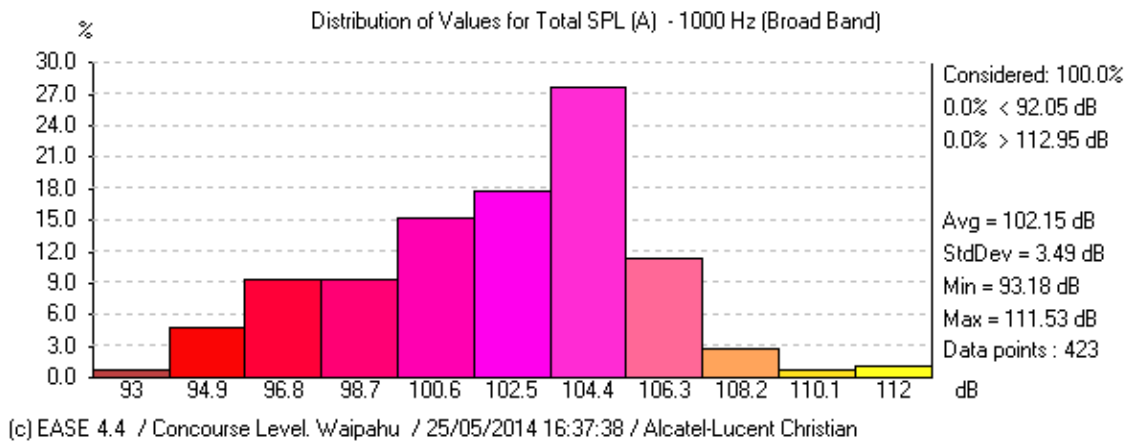


Figura 7.32: Distribución de SPL Total en Concourse level

7.5.3. Platform Level

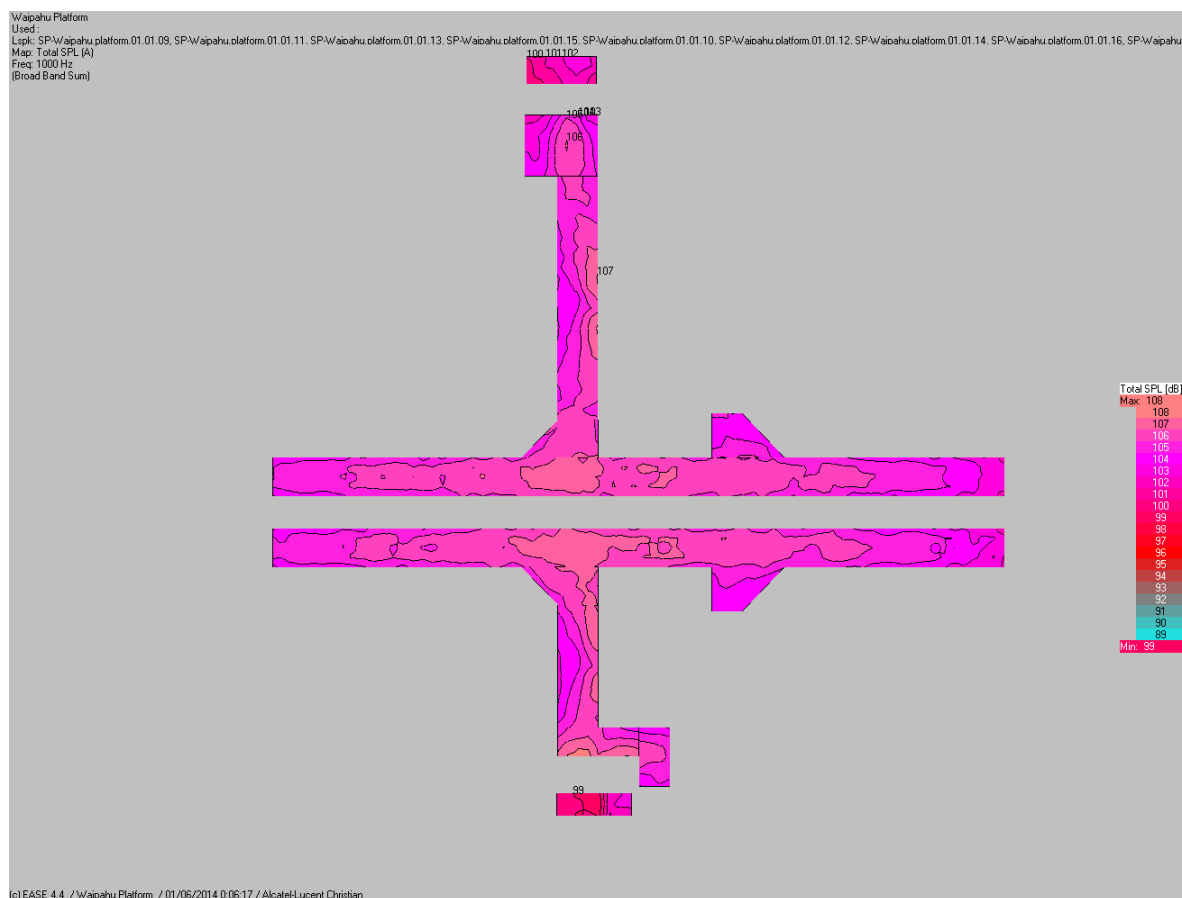


Figura 7.33: Area Mapping de SPL Total en Platform level

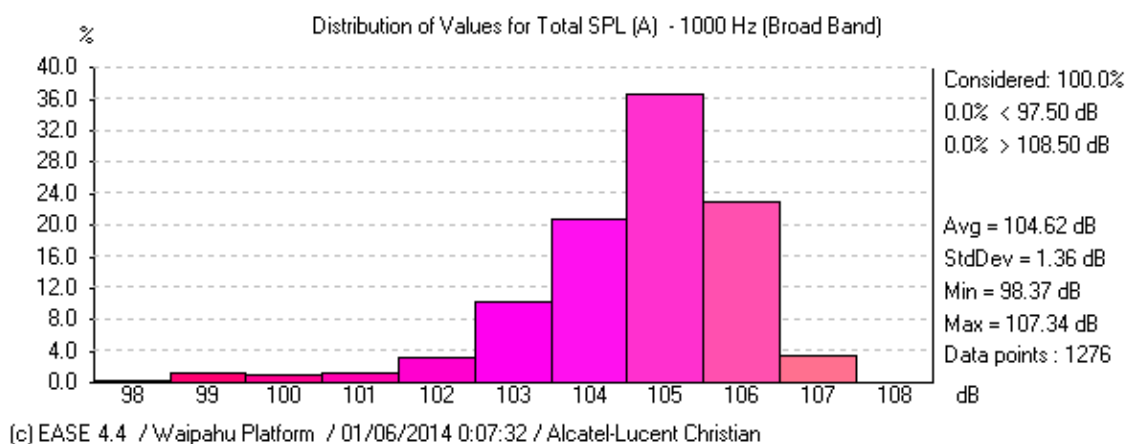


Figura 7.34: Distribución de SPL Total en Platform level

7.6. Ecualización

Este paso es muy importante en áreas dónde se quieran transmitir mensajes con un nivel de inteligibilidad considerable. La ecualización es el proceso de ajustar la respuesta en frecuencia de un área de audiencia. En este caso, será necesario conseguir una respuesta en frecuencia plana en todos los niveles de las estaciones.

Para ello, se realiza mediante la medición del campo total, en el que se tienen en cuenta tanto señales directas como reflejadas. La ecualización es única para un recinto, por lo que se ha de tener en cuenta dónde o en qué punto se desea realizar. Por ejemplo, en una sala de cine se suele hacer la ecualización tomando como referencia un punto de la sala, llamado *sweet point*. En este caso, al ser tan variadas las zonas en las que se quiere realizar la sonorización, no se tomará un único punto como referencia, sino la media de la respuesta en frecuencia en todo el recinto.

El cliente no ha establecido un criterio respecto a la ecualización, por lo que ha quedado a elección del autor decidirlo. Una de las curvas más usadas al realizar ecualizaciones es la llamada Curva X. Esta curva se utiliza, entre otras cosas, para ecualizar salas de cine. Se caracteriza por tener una respuesta plana en bajas y medias frecuencias, y una caída de 3 dB por octava en altas frecuencias a partir de 2 kHz (Figura 7.35).

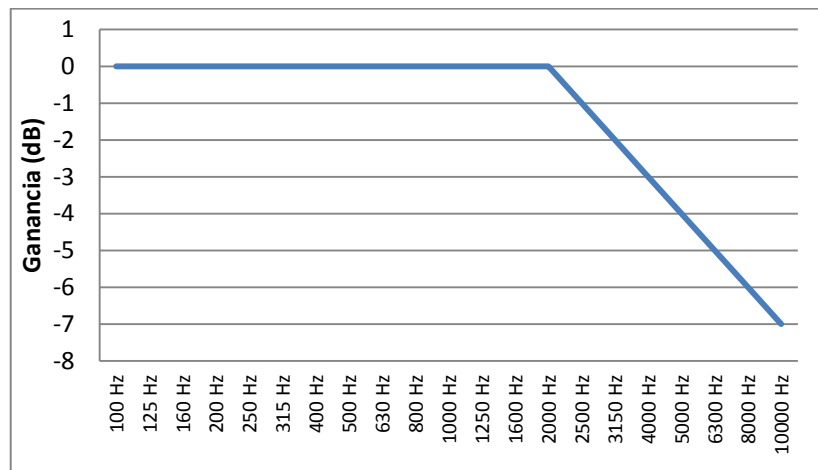
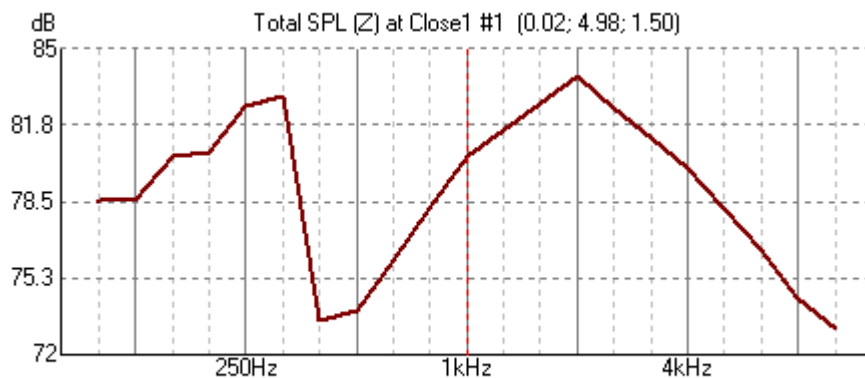


Figura 7.35: Curva X de atenuación

A continuación se mostrarán los pasos realizados para la ecualización de la zona cerrada de Ground Level.

En primer lugar, será necesario calcular el nivel total en la parte de la estación en la que se quiera realizar la ecualización. Ya se ha calculado en el apartado anterior, por lo que una vez hallado el nivel total, se copian los valores de la respuesta en frecuencia media de la sala mediante el botón *Sent values to* → *Clipboard*. En este caso, la respuesta frecuencia dada es la representada en la Figura 7.36. Como se puede observar, ésta dista mucho de ser plana, con una variación de 10 dB debido a los filtros de cruce que tienen los altavoces de techo.



(c) EASE 4.4 / Waipahu Ground / 31/05/2014 20:32:30 / Alcatel-Lucent Christian

Figura 7.36: Respuesta en frecuencia media antes de la ecualización en la zona cerrada de Ground Level

Para comenzar con la ecualización es necesario saber qué valor de la respuesta en frecuencia es el menor, teniendo en cuenta los valores de la curva X, ya que darán la forma de la respuesta en frecuencia. Para ello, se resta a cada tercio de octava el menor valor, en este caso 73,39 dB, el correspondiente a 400 Hz. Por esta razón, el valor ecualización en 400 Hz será nulo, y el resto negativo. Si algún resultado fuese mayor de 0, este cálculo estaría mal realizado y habría que tomar éste como referencia.

Estos valores hallados son los correspondientes a la ecualización que se ha de aplicar a cada altavoz por separado. Para comprobar que se han calculado bien estos valores, se pueden sumar a la respuesta en frecuencia inicial y verificar que el resultado corresponde con la forma de la curva X.

A continuación, se copian los valores de la sensibilidad a 1 m de cada frecuencia para cada modelo de altavoz a ecualizar. EASE no tiene opción de copiar estos valores directamente, por lo que deberán copiarse a mano a la tabla.

Una vez introducidos en la tabla, tan solo queda restar los valores de la ecualización a los de la sensibilidad. Estos valores serán los definitivos a introducir nuevamente en EASE. Todos los cálculos realizados se pueden ver en la Tabla 4.

Tabla 4: Cálculos para la equalización de la parte cerrada de Ground level

Frecuencia (Hz)	SPL Total antes (dB)	Curva X (dB)	EQ (dB)	SPL Total después (dB)	SPL (1 m) RCS5T antes (dB)	SPL (1 m) RCS5T después (dB)
100 Hz	78,56	0	-5,17	73,39	76,8	71,63
125 Hz	78,56	0	-5,17	73,39	76,8	71,63
160 Hz	80,44	0	-7,05	73,39	78,47	71,42
200 Hz	80,58	0	-7,19	73,39	78,37	71,18
250 Hz	82,54	0	-9,15	73,39	80,04	70,89
315 Hz	82,96	0	-9,57	73,39	79,64	70,07
400 Hz	73,39	0	0	73,39	69,24	69,24
500 Hz	73,85	0	-0,46	73,39	68,84	68,38
630 Hz	75,97	0	-2,58	73,39	70,87	68,29
800 Hz	78,16	0	-4,77	73,39	72,91	68,14
1000 Hz	80,41	0	-7,02	73,39	74,94	67,92
1250 Hz	81,52	0	-8,13	73,39	77,07	68,94
1600 Hz	82,67	0	-9,28	73,39	79,21	69,93
2000 Hz	83,85	0	-10,46	73,39	81,34	70,88
2500 Hz	82,49	-1	-10,1	72,39	82,04	71,94
3150 Hz	81,2	-2	-9,81	71,39	82,74	72,93
4000 Hz	79,93	-3	-9,54	70,39	83,44	73,9
5000 Hz	78,24	-4	-8,85	69,39	83,37	74,52
6300 Hz	76,41	-5	-8,02	68,39	83,31	75,29
8000 Hz	74,36	-6	-6,97	67,39	83,24	76,27
10000 Hz	73,04	-7	-6,65	66,39	83,24	76,59

Al igual que no se pueden copiar los valores de la sensibilidad del altavoz, tampoco se permite pegarlos, por lo que se deberán introducir a mano al igual que en el caso anterior.

Tener que introducir estos valores a mano en todos los altavoces sería una tarea muy tediosa, por lo que EASE incluye la opción de guardar la sensibilidad del altavoz en un fichero externo pulsando el botón *Save File* (Figura 7.37). Para cargar este fichero en otro altavoz, tan solo hay que pulsar el botón *Load File* y seleccionar el fichero guardado con anterioridad.

Esta opción es muy útil, ya que se podrán guardar diferentes configuraciones de un mismo altavoz y seleccionar la que se necesite en cada momento, por ejemplo, si se tienen diferentes respuestas en frecuencia o potencias.

De esta forma, se cargará el fichero en todos los altavoces del mismo modelo. Si en la sala hay más de un modelo, se deberá crear un fichero para cada modelo y cargarlo en cada uno de ellos.

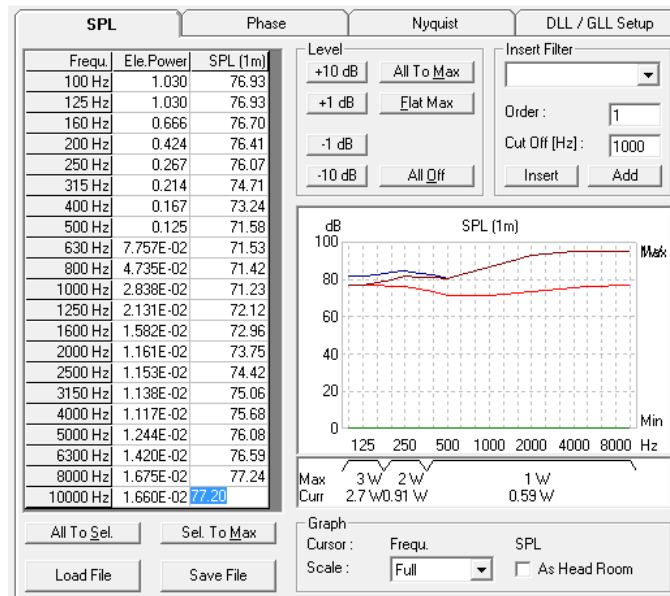


Figura 7.37: Sensibilidad, potencia y respuesta en frecuencia (en rojo la actual) del altavoz Penton RCS ST tras la equalización en la zona cerrada de Ground Level

Tras realizar estos cambios, ya se podrá calcular el nivel total en la sala para comprobar que la respuesta en frecuencia es la correcta.

La respuesta en frecuencia tras la equalización de cada una de las partes de la estación se puede ver en la Figura 7.38. Como se puede observar, en la zona cerrada del nivel inferior se ha conseguido una equalización que se adapta perfectamente a la establecida por la curva X.

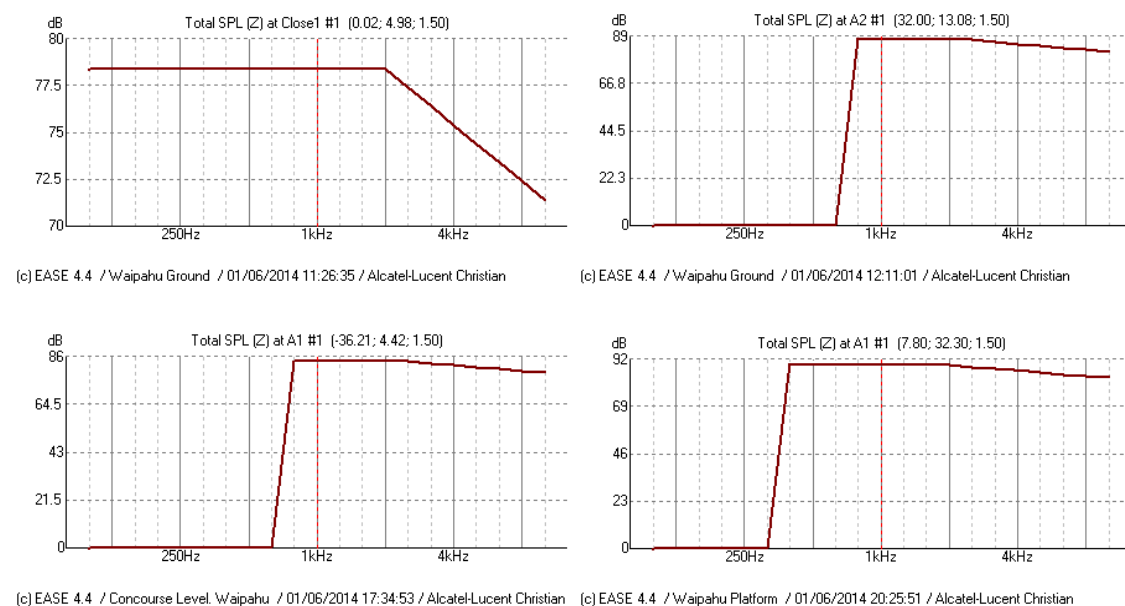


Figura 7.38: Respuesta en frecuencia media tras la equalización en: 1) Ground level cerrado; 2) Ground level abierto; 3) Concourse level; 4) Platform level

En cambio, en el resto de los niveles de la estación se tienen valores de 0 dB en la respuesta en frecuencia hasta aproximadamente los 400 Hz. Esto es debido a la respuesta en frecuencia de los modelos de altavoz APC 30T y APT 34AT en EASE, que no emiten frecuencias por debajo de 400 Hz y 800 Hz respectivamente. Por ello, en estos casos la ecualización se ha realizado sin tener estos valores en cuenta, realizando la ecualización en las frecuencias de emisión de los altavoces.

7.7. STI (Speech Transmission Index)

Tras la ecualización ya se puede proceder a hallar el STI. Es necesario calcularlo tras realizar la ecualización, ya que el STI depende de la respuesta en frecuencia. Al igual que el nivel total, se calculará con reflexiones desde Area Mapping seleccionando *Mapping* → *Standard Mapping with Reflections*, o seleccionando el botón **STI** si ya se ha realizado la simulación previamente.

No se han proporcionado niveles de ruido emitidos por los trenes, por lo que se utilizarán los hallados en el apartado 6 correspondientes a un ruido de tren de 75 dBA. El STI se puede calcular con o sin tener en cuenta el ruido de fondo, por lo que se deberá seleccionar está opción para obtener los resultados requeridos.

Para obtener la calidad de la señal correspondiente a cada valor de STI, existe una escala correspondiente a la norma IEC 60268-16 (Tabla 5). En esta se puede observar como la inteligibilidad de la estación necesaria ha de ser “aceptable” como mínimo.

Tabla 5: Calidad de la señal respecto a los valores de STI

Valor	Calidad de la señal
0.75 - 1	Excelente
0.6 - 0.75	Bueno
0.45 - 0.6	Aceptable
0.3 - 0.45	Pobre
0 - 0.3	Malo

A continuación se muestran los resultados de inteligibilidad para cada zona de la estación.

7.7.1. Ground level

Zona abierta

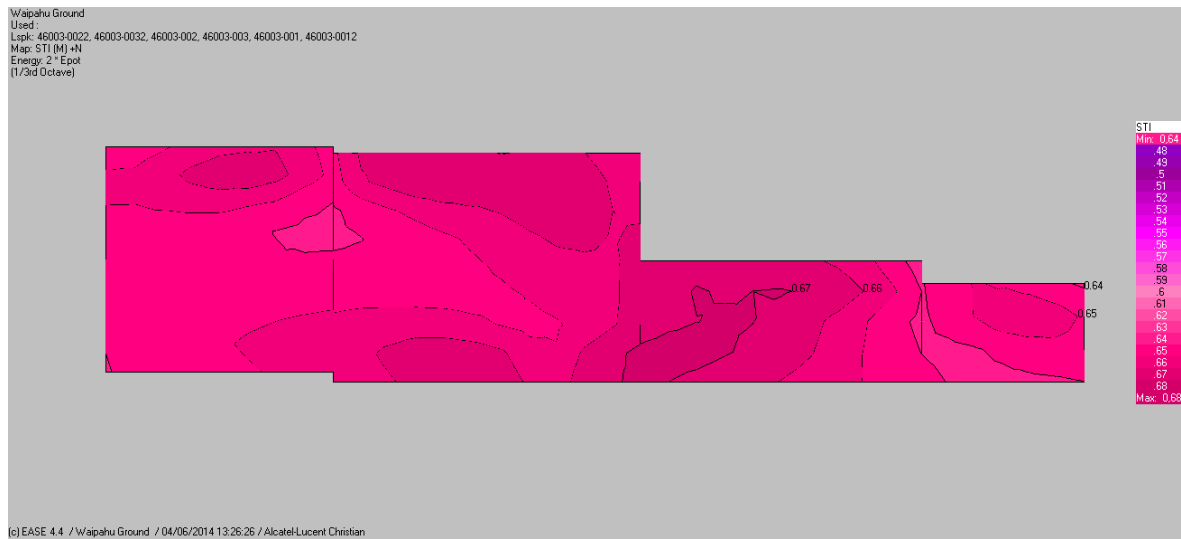


Figura 7.39: Area Mapping de STI en el área abierta de Ground level

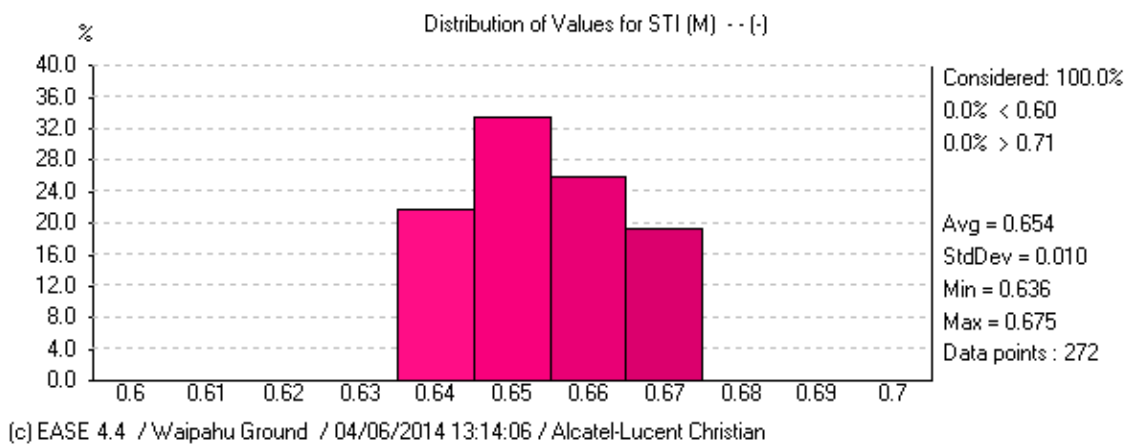


Figura 7.40: Distribución de STI en el área abierta de Ground level

7.7.2. Concourse level

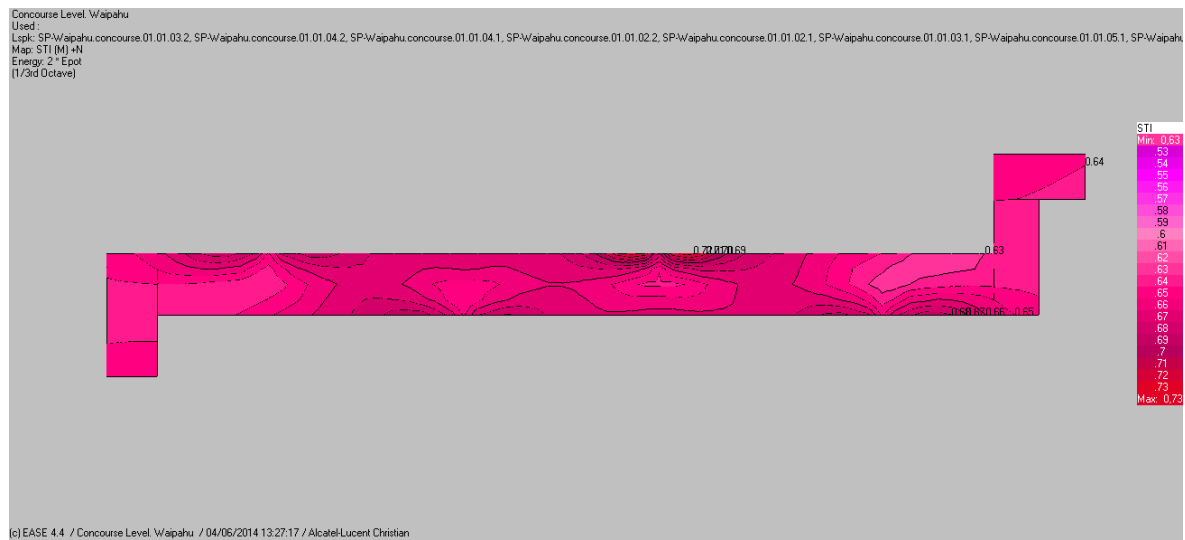


Figura 7.43: Area Mapping de STI en Concourse level

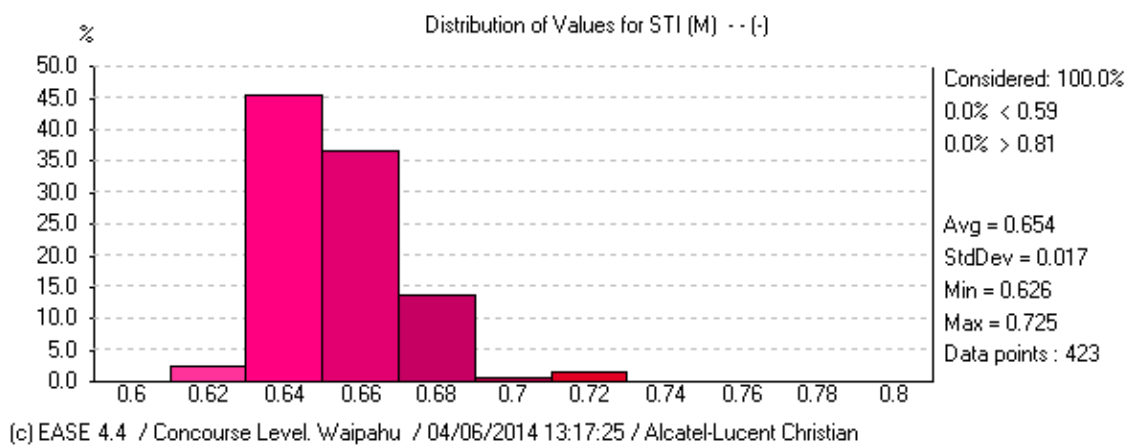


Figura 7.44: Distribución de STI en Concourse level

8. Conclusiones de las simulaciones

Dadas por finalizadas todas las simulaciones, queda comprobar que el diseño cumple con los requisitos establecidos en toda la estación.

En primer lugar, se ha de verificar que el nivel de presión sonora total emitido es correcto. Para ello, se tendrá en cuenta cada uno de los niveles de la estación tanto por separado como en conjunto. La representación gráfica de estos valores se encuentra en la Figura 8.1.

Según dictaban los requisitos, se ha de tener un nivel mayor de 75 dBA y menor de 120 dBA. Este requisito se cumple claramente, al tener un mínimo de nivel de presión sonora de 90 dBA y un máximo de 112 dBA en toda la estación.

El siguiente requisito a cumplir es obtener un SPL de al menos 15 dB mayor que el nivel ruido de fondo, es decir, una relación señal a ruido o SNR de 15 dB. Para este caso se deberá considerar cada zona por separado, ya que el SNR es diferente para cada nivel.

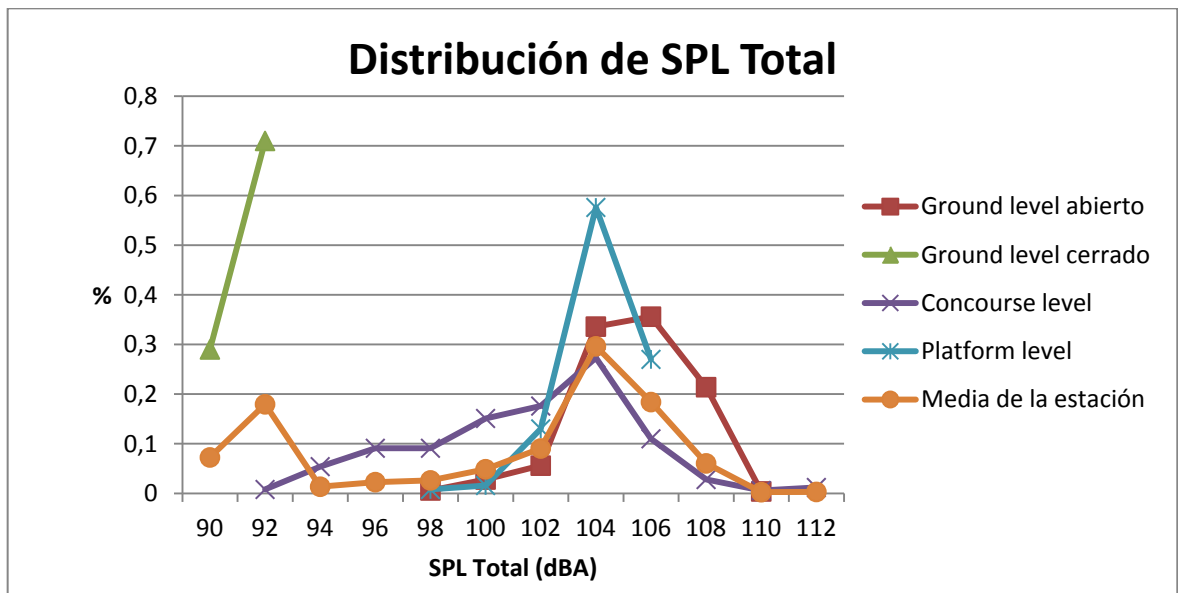


Figura 8.1: Distribución de SPL Total en cada uno de los niveles y el total de la estación

En las áreas cerradas de Ground Level se espera tener un nivel de ruido bajo al estar aisladas de las zonas externas. Esta zona tendrá tan solo el ruido perteneciente a los equipos y personas que se encuentren dentro. Por ello, se considera que un nivel de 90 dBA en esta zona es más que suficiente para superar el nivel de ruido de fondo.

En el resto de áreas se considerará como ruido de fondo el indicado como nivel de ruido del tren, 75 dBA. Como se puede observar, el nivel de presión sonora mínimo que se tiene es de 92 dBA en la zona de Concourse Level. Esto implica que en esta área la relación señal a ruido

será como mínimo 23 dBA. En Ground Level la relación señal a ruido es de al menos 28 dBA y, finalmente, en los andenes de la estación se tiene un SNR mínimo de 27 dBA.

Estos valores superan con creces los requisitos, por lo que se tendrá un margen de SNR si se quisiese hacer un ajuste de potencia de los altavoces más adelante en caso de que el nivel fuese demasiado alto.

Tras confirmar que se han cumplido los requisitos de nivel de señal, se procede con la inteligibilidad. En los requisitos se indica que en un 90% de las áreas el STI tiene que ser mayor de 0,5, y en un 100% de las áreas mayor de 0,4.

En la Figura 8.2 se puede observar la distribución de STI en cada uno de los niveles de la estación y el total. Para comprobar este requisito se ha de tener en cuenta la estación como conjunto, ya que, aunque en una zona no se cumpla este requisito, se podrá contrarrestar con los resultados de otras zonas.

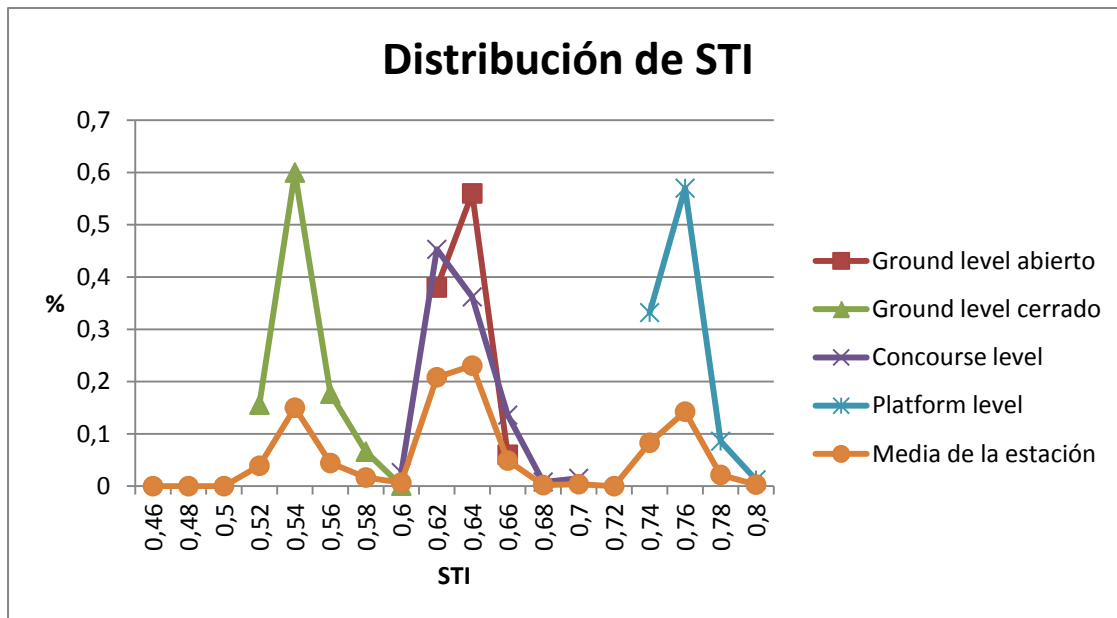


Figura 8.2: Distribución de STI en cada uno de los niveles y el total de la estación

El valor de STI mínimo en la estación se tiene en la zona cerrada de Ground Level, con valores de 0,52. A pesar de que es un valor bajo, es mayor del mínimo dado en los requisitos. Con estos resultados se comprueba que hay un 100% de zonas con un STI mayor de 0,5.

El resto de valores son mayores de 0,5, con un máximo de 0,80 en los andenes, donde se tiene el mejor resultado de inteligibilidad. En definitiva, la estación cuenta con aproximadamente un 20% del área con un STI de 0,62 y un 23% del área con un valor de STI de 0,64, valores que se consideran buenos según los criterios de inteligibilidad.

Con estos resultados se dan por cumplidos los requisitos de calidad de señal dados por el cliente, con un SNR de al menos 23 dBA y un STI “aceptable” en la zona cerrada de Ground Level, “bueno” en Concourse Level y “excelente” en Platform Level.

Para los cálculos de potencia por zona, se ha considerado que la potencia consumida por cada altavoz es su máxima, a pesar de que se configuren a una potencia menor. Esto hará que, en caso de tener que utilizar los altavoces a mayor potencia de la calculada, no se sobrecarguen los amplificadores.

En la estación de Waipahu Transit Center serán necesarios un total de 11 altavoces de techo, 16 altavoces de bocina y 11 bidireccionales. La potencia total consumida es de 910 W (Tabla 5).

Tabla 6: Número final de altavoces y potencia por zona de la estación

Zona	RCS 5T @ 10 W	APC 30T @ 30 W	APT 34AT @ 30 W	Potencia total (W)
Ground level	10		3	190
Concourse level	1		4	130
Platform Mauka		8	2	300
Platform Makai		8	2	300
Total	11	16	11	910

Se puede dar por finalizada la disposición de altavoces. A continuación se procederá a realizar el diseño de los bucles de altavoces y el cálculo de los amplificadores.

9. Cálculo de amplificadores

Una línea de alta impedancia consiste en aumentar la impedancia de entrada a cada altavoz mediante un transformador y a su vez el voltaje de la línea, para que no disminuya la potencia. De esta forma, las pérdidas resultantes por la longitud de los cables son muy bajas en comparación con las líneas de baja impedancia, ya que la impedancia de entrada a los altavoces vista desde el amplificador es mucho mayor que la del cable. Además, es muy útil en caso de que se quieran realizar futuras ampliaciones en el futuro, ya que sería tan sencillo como conectar los nuevos equipos.

Los altavoces se conectan en paralelo a la línea, y la suma de potencia de éstos no deberá superar la del amplificador. En caso de que se superase esta potencia, el amplificador podría sobrecalentarse y dañarse.

Para realizar el cálculo del número de amplificadores necesarios, se deberán tener en cuenta los requisitos dados por el cliente. Como ya se ha visto en el capítulo 4, en este proyecto se usará el modelo de amplificador DCi Network 4N/300. Este amplificador dispone de 4 canales de salida con 300 W de potencia cada uno.

El primer requisito que se ha de considerar es que cada canal ha de tener una redundancia de al menos el 50%, es decir, consumir como mucho la mitad de la potencia de éste. Aplicar esta medida puede ser muy útil en el caso de que se quiera ampliar el sistema en un futuro. Si cada canal se utilizase al máximo de su potencia, para realizar una ampliación habría que introducir nuevos amplificadores en el sistema. En cambio, al estar utilizándose a la mitad de su potencia, se podrán conectar como mínimo el mismo número de equipos actuales.

Cada canal de los amplificadores tiene una potencia de 300W, por lo que se podrá usar un máximo de 150 W en cada canal.

El siguiente requisito indica que hay que contar con que cada nivel de la estación con alto nivel de ruido, es decir, Concourse Level y Platform Level, deberá ser capaz de estar cubierto a pesar de que falle un canal o amplificador. Esto implica que se necesitarán al menos 2 canales para cada uno de estos niveles. Se tiene que tener también en cuenta que cada andén ha de tratarse como zona independiente.

Con esta información y los datos calculados en el apartado anterior se estima que se necesitarán:

- 2 para Ground level, uno para la zona cerrada (100 W) y otro para la zona abierta (90 W).
- 2 para Concourse level, uno para cada bucle (60 W y 70 W).
- 4 para Platform level, 2 canales por andén para tener 2 bucles independientes de 150 W en cada uno.

Esto corresponde con un mínimo de 8 canales, es decir, 2 amplificadores.

Los bucles se han realizado de forma que en cada andén (Figura 9.4) y en Concourse Level (Figura 9.3) haya dos líneas diferentes, para que, en caso de que una fallase, la otra siguiese operativa. En el caso de Ground Level, se ha separado la zona abierta (Figura 9.2) de la zona cerrada (Figura 9.1), ya que tendrán mensajes independientes entre sí.

Cada altavoz va conectado a una Junction Box que permitirá enviar la señal de audio a éste y al próximo del bucle, de forma que se distribuye la señal de audio por todos los altavoces sin que las conexiones del cableado estén al aire libre y puedan sufrir desperfectos.

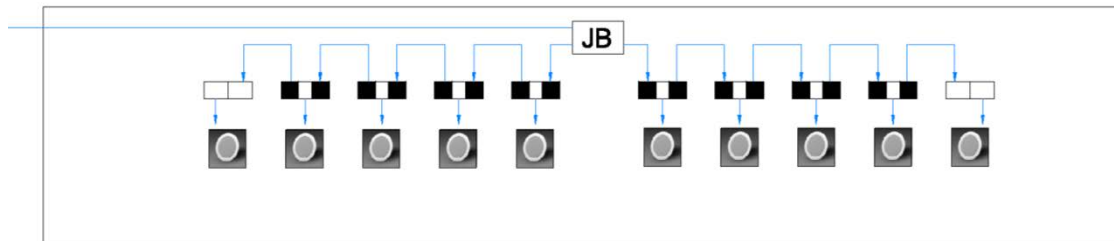


Figura 9.1: Bucle de altavoces en Ground Level cerrado

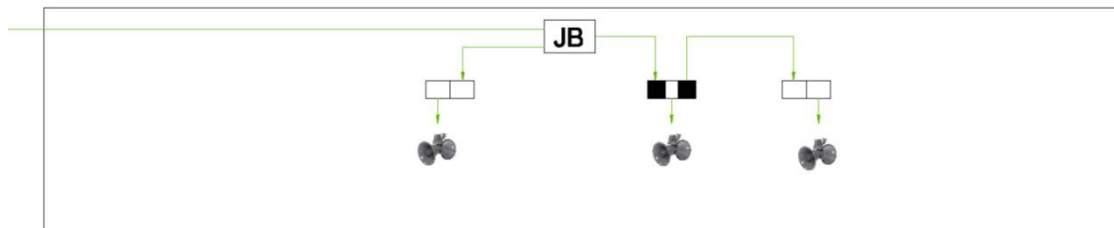


Figura 9.2: Bucle de altavoces en Ground Level abierto

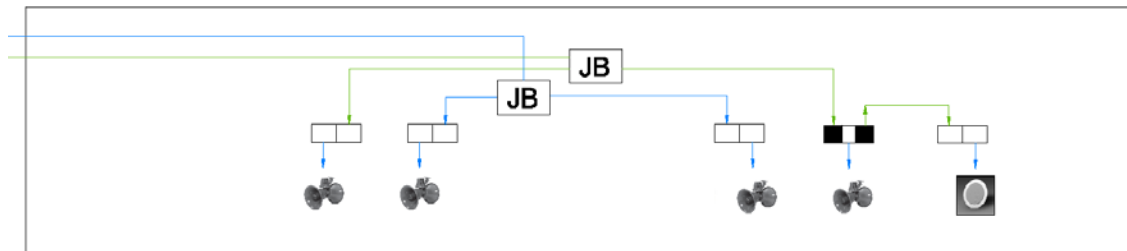


Figura 9.3: Bucle de altavoces en Concourse Level

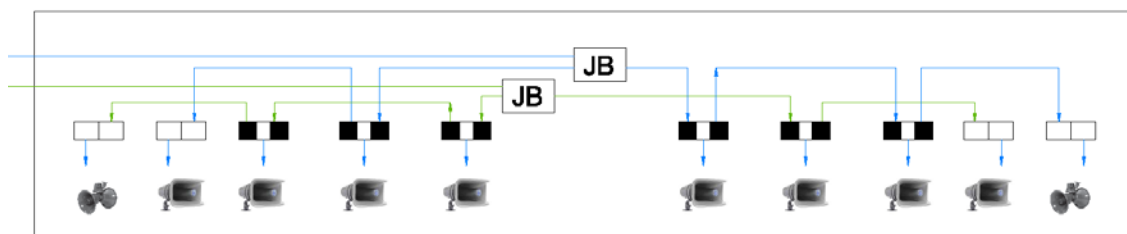


Figura 9.4: Bucle de altavoces en el andén de Mauka/Makai (son iguales)

Los canales pertenecientes a una misma zona no han de pertenecer al mismo amplificador, por lo que han de distribuirse entre diferentes amplificadores.

A continuación, se deberá añadir la redundancia. Para ello se tendrá un canal de redundancia adicional a los necesitados, es decir, se contará con un total de 9 canales.

Este número de canales ya supone utilizar un tercer amplificador, del que 3 canales estarán sin utilizar. Por ello, estos canales se añadirán a los disponibles para redundancia. Se repartirán por los diferentes amplificadores al tener que distribuir los canales de cada zona entre ellos (Tabla 6). Esto permitirá que en caso de que un amplificador fallase, se tendría un canal de redundancia en cada uno de los que siguen funcionando.

Tabla 7: Cálculo de potencia por zona y canal de cada amplificador

Zona	Amplificador	Canal	RCS 5T @ 10 W	APC 30T @ 30 W	APT 34AT @ 30 W	Potencia usada (W)
Ground level cerrado	1	1	10			100
Ground level abierto	2	1			3	90
Concourse A	1	2			2	60
Concourse B	2	2	1		2	70
Platform Mauka A	1	3		4	1	150
Platform Mauka B	3	3		4	1	150
Platform Makai A	3	4		4	1	150
Platform Makai B	2	4		4	1	150
Redundancia	1	4				0
Redundancia	2	3				0
Redundancia	3	1				0
Redundancia	3	2				0

Para finalizar, se muestran los resultados de redundancia por canal de cada amplificador en la Tabla 7. Se puede observar cómo, efectivamente, se han cumplido los requisitos, ya que se tiene como mínimo un 50% de redundancia en cada canal, además de 4 canales con un 100% de redundancia.

Tabla 8: Cálculo de redundancia por amplificador

Amplificador	Canal	Potencia usada (W)	Potencia disponible (W)	Redundancia (%)
Amplificador 1	1	100	300	66,7%
	2	60	300	80,0%
	3	150	300	50,0%
	4	0	300	100,0%
Amplificador 2	1	90	300	70,0%
	2	70	300	76,7%
	3	0	300	100,0%
	4	150	300	50,0%
Amplificador 3	1	0	300	100,0%
	2	0	300	100,0%
	3	150	300	50,0%
	4	150	300	50,0%

10. Ubicación de micrófonos

Tal como se ha indicado en el capítulo 4, se situarán micrófonos en zonas de la estación en las que se espera una alta variación de ruido para poder variar el nivel de señal emitido.

En el nivel inferior de la estación no se espera tener mucho nivel de ruido, por lo que no se tendrá en cuenta. En cambio, en Concourse Level y Platform level se tendrán altas variaciones de nivel dependiendo de la afluencia de usuarios y/o entrada de trenes a la estaciones.

El peor de los casos que se podría tener sería en el que se encontrasen los dos trenes situados en la estación y un alto número de personas. Este caso se puede considerar en hora punta del día, donde la mayor parte de los usuarios se dirigen a sus puestos de trabajo, estudiantes a la universidad y turistas que vayan a desplazarse por la ciudad.

Como ya se ha explicado anteriormente, no se pueden incluir planos proporcionados por el cliente, por lo que para indicar las posiciones de los micrófonos se indicarán en los diseños realizados en EASE.

10.1. Concourse Level

En Concourse Level se situará un único micrófono, ya que no sólo depende de la amplitud de la zona a medir, si no de las posibles ubicaciones en las que se pueda situar. En este caso, al tratarse de un pasillo en el que la mayor parte estará delimitada por barandillas y pilares, no se podrá situar en estas zonas. Además, se ha de situar en la zona que pueda ofrecer más información, es decir, donde se pueda producir el mayor nivel de ruido.

La situación óptima para el micrófono será en una ubicación cercana a las escaleras de acceso a los andenes, así como en una pared sólida en la que pueda instalarse. Esta descripción corresponde con la zona de techo bajo de Concourse Level (Figura 10.1 y Figura 10.2).

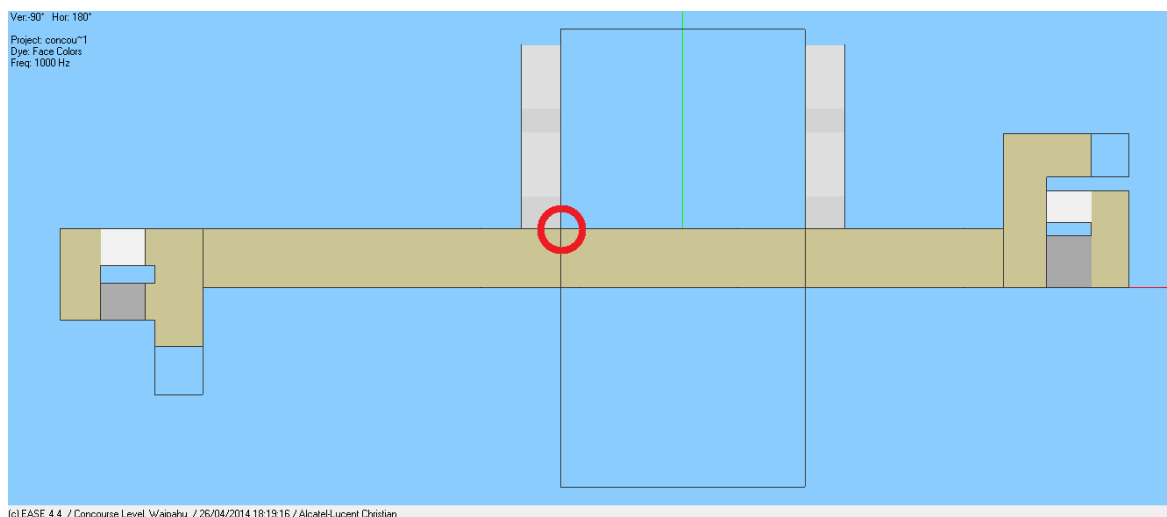


Figura 10.1: Posición del micrófono en Concourse Level. Vista en planta

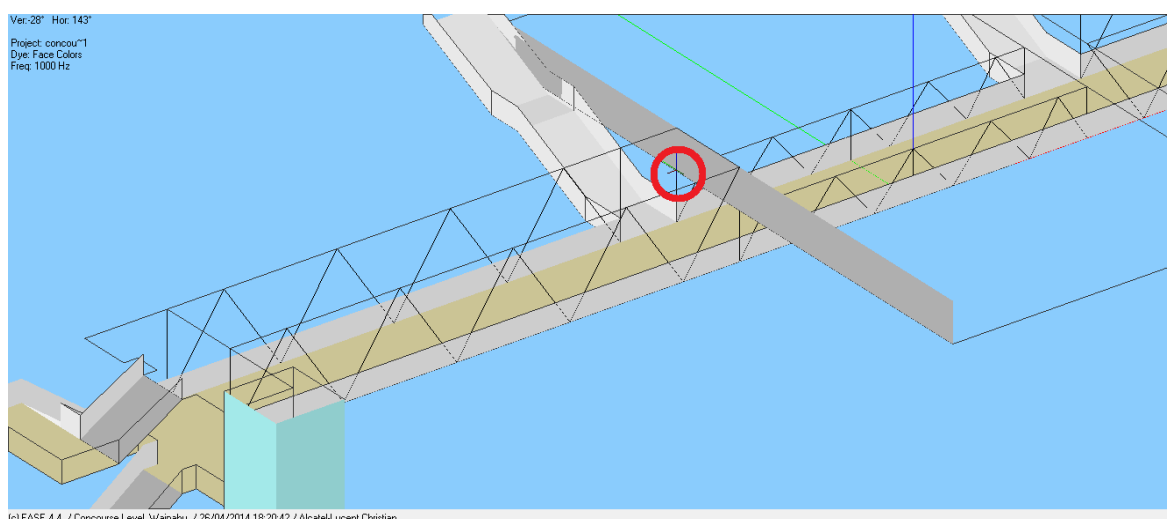


Figura 10.2: Posición del micrófono en Concourse Level. Vista en 3D

10.2. Platform Level

En el caso de Platform Level, el mayor nivel de ruido se obtendrá en los propios andenes. Se situará un micrófono en cada andén para poder regular la potencia independientemente, evitando emitir con mayor potencia de la necesaria en un andén en el que haya menor nivel de ruido.

La posición óptima de cada micrófono será cerca de las escaleras, dónde se encontrará la mayor afluencia de personas. Además, en esta valla se encontrarán carteles informativos y un teléfono de emergencia, por lo que está preparado para el montaje de otros equipos como el micrófono (Figura 10.3 y Figura 10.4).

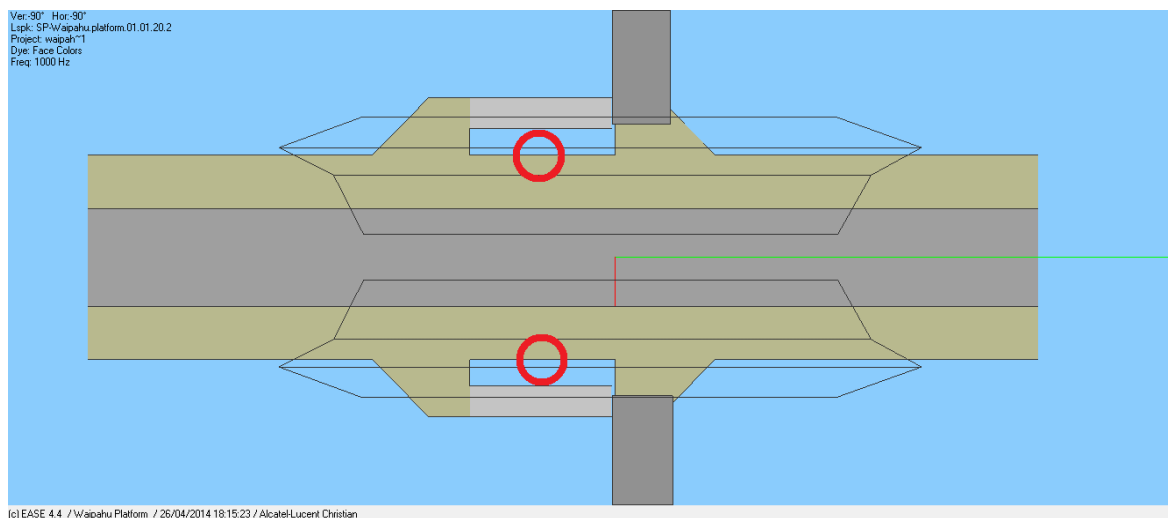


Figura 10.3 Posiciones de los micrófonos en Platform Level. Vista en planta

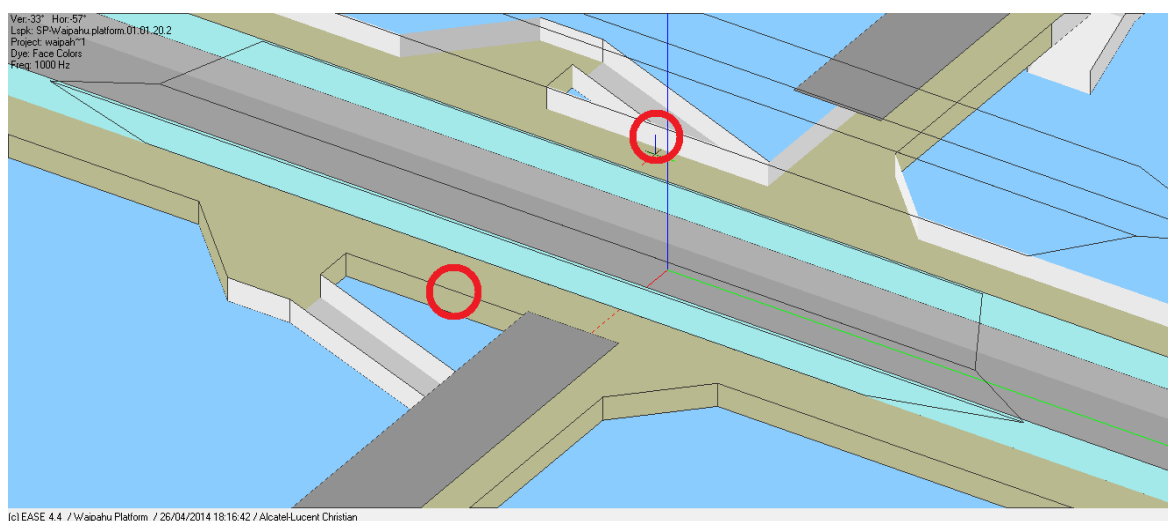


Figura 10.4: Posiciones de los micrófonos en Platform Level. Vista en 3D

11. Conexión del sistema PAGA

Llegados a este punto, ya se han realizado las simulaciones necesarias para comprobar que el número de altavoces es el correcto. Tras esto se ha procedido a hallar el número de amplificadores necesarios para el conexionado en bucle de estos altavoces, y finalmente se ha hallado la situación óptima para situar los micrófonos en la estación.

El resto de equipos a utilizar, mencionados en el capítulo 5, son individuales, por lo que sólo será necesaria una unidad de cada.

El conexionado entre estos equipos ha de realizarse tanto a nivel de la estación, en el que se incluyan las conexiones entre los altavoces y el resto de equipos, como dentro del TCCR, donde se muestren las conexiones entre cada uno de los equipos que estén dentro del rack.

En primer lugar se realiza el conexionado a nivel de la estación. Los bucles de altavoces ya se han diseñado, por lo que queda realizar las conexiones con el resto de equipos de la estación. En primer lugar se añaden los micrófonos en los niveles donde se han situado. Los altavoces van conectados a través de junction box, así que cada cable correspondiente a un bucle va a los bloques terminales. Éstos son el punto intermedio entre los equipos de TCCR y los altavoces y micrófonos (Figura 11.1).

Dentro de TCCR el conexionado se ha realizado comenzando por los amplificadores. Cada amplificador va conectado al switch, y entre ellos mismos realizando un bucle con el procesador. En la imagen anterior no se podía realizar con ese nivel de detalle, aunque sí en la Figura 11.2. Como se puede observar, se conectan mediante el mencionado enlace Blu Link. La salida de cada canal de los amplificadores va conectado al failover switch, en el que hay que distinguir cuáles son los canales primarios y cuáles los de redundancia.

Por otra parte, el procesador se conecta al SCU para poder controlar el primero a través del ordenador. Estos dos equipos a su vez irán conectados al switch para estar enlazados a la red. Además de estas conexiones, el procesador tiene las señales de entrada de los micrófonos, tanto de los ANS como de los instalados para emisiones de mensajes dentro de TCCR. Todas estas salidas irán conectadas a los bloques terminales, así como las salidas del failover switch. De esta forma se consigue una mejor distribución del cableado, y eficiencia y sencillez en caso de tener que sustituir cableado o buscar la señal de alguna de estas salidas.

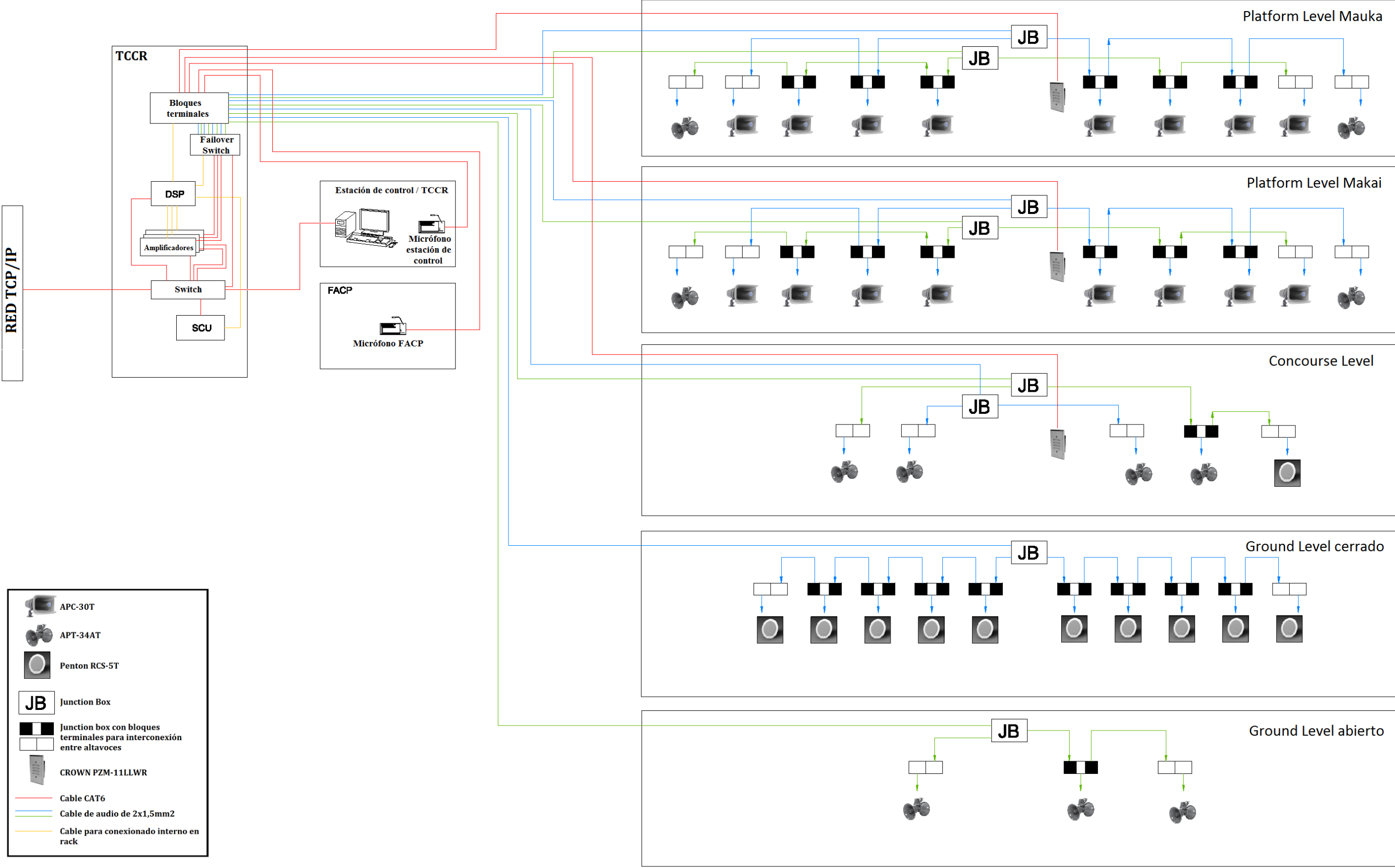


Figura 11.1: Conexionado de los equipos en TCCR

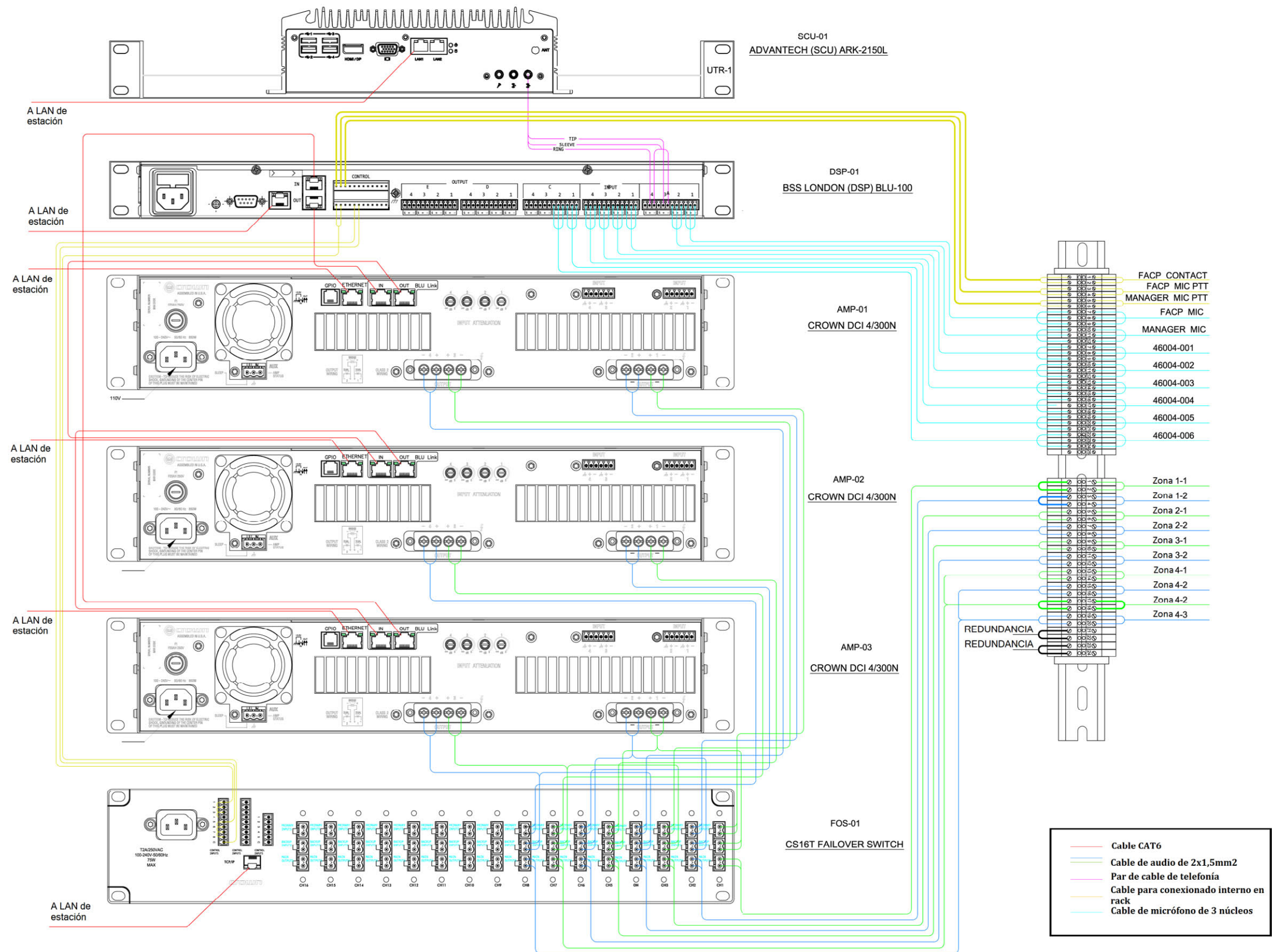


Figura 11.2: Detalle de las conexiones en el rack

12. Etiquetado de los equipos

Concluidas las simulaciones y el conexionado de los equipos tan solo queda realizar su etiquetado. Cada equipo irá representado mediante una etiqueta que sigue el siguiente código:

Y1Y2.Y3Y4Y5-K1K2K3@X1X2 X3X4

- Y1Y2 corresponde con el subsistema de telecomunicaciones al que pertenece, en este caso es *Passenger Information System* o PAGA, por lo que Y1Y2= 46.
- Y3Y4Y5 es el código del producto. Por ejemplo, el modelo de altavoz Penton RCS5T72 es Y3Y4Y5=001 (Tabla 8).
- K1K2K3 identifica el número de producto, es decir, el código que diferencia los equipos del mismo modelo. En el caso de los altavoces, este código se otorgará de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo de los planos dados. Por ejemplo, el primer altavoz será K1K2K3=001, el siguiente K1K2K3=002 y así sucesivamente.
- X1X2 corresponde con la estación en la que se encuentran los equipos. En este caso, Waipahu Transit Center es X1X2=05.
- Finalmente, X3X4 es el código de la zona de la estación en la que se encuentra el equipo. Se distinguen los dos andenes (X3X4=01 ó 02), sala de equipos TCCR (X3X4=04), Ground level (X3X4=08) y Concourse level (X3X4=07).

Tabla 9: Códigos de los equipos para etiquetado

Subsistema (Y1Y2)	Y3Y4Y5	Equipo	Descripción
46	001	Penton RCS 5T	Altavoz de techo
46	002	Atlas APC-30T	Altavoz de bocina
46	003	Atlas APT-34AT	Altavoz bidireccional
46	004	Crown PZM-11LLWR	Micrófono ANS
46	005	Crown DCi Network 4 300	Amplificador
46	006	Soundweb London BLU-100	Procesador
46	007	Advantech ARK-3360F	SCU
46	008	Crown CT16S	Failover switch
46	009	Penta TBMS	Estación de control
46	010	Shure 527B	Micrófono

Siguiendo estos criterios se etiquetan cada uno de los equipos. Se ha realizado de forma independiente para altavoces y el resto de equipos. En la Tabla 9 se encuentra reflejado el etiquetado para los altavoces, así como su lugar de montaje en la estación.

Tabla 10: Etiquetado de altavoces

X1X2	X3X4	Etiqueta (Y1Y2.Y3Y4Y5-K1K2K3)	Modelo	Lugar de montaje
05	08	46.001-001	Penton RCS 5T	Techo
05	08	46.001-002	Penton RCS 5T	Techo
05	08	46.001-003	Penton RCS 5T	Techo
05	08	46.001-004	Penton RCS 5T	Techo
05	08	46.001-005	Penton RCS 5T	Techo
05	08	46.001-006	Penton RCS 5T	Techo
05	08	46.001-007	Penton RCS 5T	Techo
05	08	46.001-008	Penton RCS 5T	Techo
05	08	46.001-009	Penton RCS 5T	Techo
05	08	46.001-010	Penton RCS 5T	Ascensor Makai
05	08	46.003-001	Atlas APT-34AT	Pared
05	08	46.003-002	Atlas APT-34AT	Pared
05	08	46.003-003	Atlas APT-34AT	Pared
05	07	46.003-004	Atlas APT-34AT	Pilar concourse
05	07	46.003-005	Atlas APT-34AT	Pilar concourse
05	07	46.003-006	Atlas APT-34AT	Pilar concourse
05	07	46.003-007	Atlas APT-34AT	Pilar concourse
05	07	46.001-011	Penton RCS 5T	Ascensor Mauka
05	01	46.003-008	Atlas APT-34AT	Pilar platform
05	01	46.003-009	Atlas APT-34AT	Pilar platform
05	01	46.002-001	Atlas APC-30T	Andén Makai
05	01	46.002-002	Atlas APC-30T	Andén Makai
05	01	46.002-003	Atlas APC-30T	Andén Makai
05	01	46.002-004	Atlas APC-30T	Andén Makai
05	01	46.002-005	Atlas APC-30T	Andén Makai
05	01	46.002-006	Atlas APC-30T	Andén Makai
05	01	46.002-007	Atlas APC-30T	Andén Makai
05	01	46.002-008	Atlas APC-30T	Andén Makai
05	02	46.002-009	Atlas APC-30T	Andén Mauka
05	02	46.002-010	Atlas APC-30T	Andén Mauka
05	02	46.002-011	Atlas APC-30T	Andén Mauka
05	02	46.002-012	Atlas APC-30T	Andén Mauka
05	02	46.002-013	Atlas APC-30T	Andén Mauka
05	02	46.002-014	Atlas APC-30T	Andén Mauka
05	02	46.002-015	Atlas APC-30T	Andén Mauka
05	02	46.002-016	Atlas APC-30T	Andén Mauka
05	02	46.003-010	Atlas APT-34AT	Pilar platform
05	02	46.003-011	Atlas APT-34AT	Pilar platform

El etiquetado del resto de equipos, tanto los que se encuentran como en TCCR como micrófonos se encuentra reflejado en la Tabla 10.

Tabla 11: Etiquetado de micrófonos y equipos de TCCR

X1X2	X3X4	Etiqueta (Y1Y2.Y3Y4Y5-K1K2K3)	Modelo	Lugar de montaje
05	07	46.004-001	Crown PZM-11LLWR	Concourse
05	01	46.004-002	Crown PZM-11LLWR	Platform
05	02	46.004-003	Crown PZM-11LLWR	Platform
05	04	46.005-001	Crown DCi Network 4 300	TCCR
05	04	46.005-002	Crown DCi Network 4 300	TCCR
05	04	46.005-003	Crown DCi Network 4 300	TCCR
05	04	46.006-001	Soundweb London BLU-100	TCCR
05	04	46.007-001	Advantech ARK-3360F	TCCR
05	04	46.008-001	Crown CT16S	TCCR
05	04	46.009-001	Penta TBMS	TCCR
05	04	46.010-001	Shure 527B	TCCR

13. Presupuesto

Para finalizar, se realiza un presupuesto estimado de los costes del diseño del sistema PAGA en la estación de Waipahu Transit Center. Los costes se han proporcionado en dólares americanos, por lo que el presupuesto se ha calculado en esta moneda.

Tabla 12: Presupuesto de equipos

Producto	Cantidad	Modelo	Precio	Total
Altavoz de techo	11	Penton RCS 5T	\$81,35	\$894,85
Altavoz bidireccional	11	Atlas APT-34AT	\$144,50	\$1 589,50
Altavoz de bocina	16	Atlas APC-30T	\$183,72	\$2 939,52
Junction box	46	OBO BETTERMANN-B9/T	\$6,20	\$285,20
Amplificador	3	DCi 4/300N	\$2 543,36	\$7 630,08
Amplificador Failover Switch	1	CTS 16S	\$1 997,84	\$1 997,84
SCU	1	ARK2150L	\$1 273,00	\$1 273,00
Procesador de audio	1	BL100	\$2 150,00	\$2 150,00
Microfóno ANS	4	Crown PZM-11LLWR	\$199,00	\$796,00
Fuente de alimentación para ANS	4	PULS ML30.100	\$78,61	\$314,44
Microfóno FACP	1	Shure 527 B	\$110,00	\$110,00
Estación de control	1	Penta TBMS Incl. Shure 527 B	\$234,41	\$234,41
Bloques terminales	242	ContaClip Inputs: 17100.2 (SRK2.5) Outputs: 17104.2 (SRK4)	\$1,20	\$290,40
			Total	\$20 505,24

Tabla 13: Presupuesto de la mano de obra

Producto	Horas	Descripción	Precio/Hora	Total
Selección de equipos	60	Elección de los equipos necesarios teniendo en cuenta los requisitos dados. En el caso de los altavoces, se realiza un estudio de calidad/precio, en el que se comparan las características de cada uno y se realiza un pequeño estudio acústico.	\$6,00	\$360,00
Estudio inicial	80	Primer estudio acústico de la estación. Se calculan niveles de ruido de fondo y mediante el alcance de los altavoces seleccionados se seleccionan las posiciones óptimas de los altavoces.	\$8,00	\$640,00
Simulaciones	180	Realización de las simulaciones necesarias mediante el software EASE 4.4. En este apartado se incluye tanto el diseño de la estación, como el estudio acústico y los resultados.	\$10,00	\$1 800,00
Cálculo de equipo y conexionado	60	Cálculo de los amplificadores necesarios, así como de la realización de los bucles de altavoces y el conexionado entre todos los equipos dentro del rack.	\$8,00	\$480,00
Etiquetado	40	Etiquetado de todos los equipos del sistema PAGA, tanto los altavoces y micrófonos, como de los equipos en rack.	\$8,00	\$320,00
Documentación	60	Realización de los documentos con los resultados a entregar al cliente.	\$6,00	\$360,00
			Total	\$3 960,00

El presupuesto total es el indicado en la Tabla 13. Como se ha dicho, este presupuesto contiene tan solo el coste de los equipos y de la mano de obra del diseño del sistema. Para obtener el presupuesto del coste total habría que incluir más adelante la mano de obra para la instalación de todos estos equipos, así como todos los soportes de montaje y cableado.

Tabla 14: Presupuesto total

Producto	Total
Equipos	\$20 505,24
Mano de obra	\$3 960,00
	\$24 465,24

14. Conclusiones

En este proyecto se ha realizado el diseño acústico y electroacústico de la estación de tren Waipahu Transit Center. Esta estación forma parte de la línea de tren Honolulu Rail Transit, en Hawái. Esta línea constará de 21 estaciones donde se realizarán diseños similares al expuesto en este documento.

Dado que todos los planos pertenecen al gobierno de Estados Unidos, no se han podido mostrar ninguno de estos. A pesar de esto, al ser público el diseño de las estaciones y poder consultarse en la página web oficial del proyecto, se ha descrito el diseño y mostrado representaciones 3D de la estación.

A continuación se han expuesto los requisitos dados por el cliente, en los que se indican todas las condiciones que ha de cumplirse en cuanto a la selección de equipos, parámetros de calidad de señal y diseño del sistema.

El cliente no ha proporcionado niveles de ruido en la estación, aunque sí el máximo que deberá emitir el tren en dBA. Por ello, se ha estimado un nivel de ruido de fondo en tercios de octava a partir del espectro de ruido del paso de un tren en China. Para ello se ha reducido el nivel en cada tercio de octava hasta que la suma en banda ancha y ponderado A fuese el dado en los requisitos. De esta forma se ha conservado la forma del espectro, aunque con un nivel de presión sonora menor.

Para facilitar el diseño de la estación y el cómputo de resultados, se ha dividido la estación en tres zonas que corresponden con los diferentes niveles de ésta: Ground Level, Concourse Level y Platform Level. Cada nivel se ha diseñado lo más afín a los planos posible, aunque siempre teniendo en cuenta que un alto nivel de detalle hará que la computación se alargue. Además, se han utilizado los materiales proporcionados en la base de datos de EASE debido a la falta de información sobre los coeficientes de absorción de los materiales de la estación.

Hay que destacar la dificultad que ha supuesto realizar el estudio acústico mediante el software EASE 4.4 para un recinto abierto. No solo se presentan problemas para poder realizar ciertos cálculos, si no que para poder hallar parámetros como SPL total o STI se ha de hacer un estudio previo.

En primer lugar se ha de calcular el tiempo de reverberación de sala mediante su respuesta al impulso, ya que EASE no lo puede calcular mediante acústica estadística al estar el recinto abierto. Para ello se utiliza el método Ray Tracing, que emite una cantidad de rayos por cada altavoz y calcula las reflexiones en el recinto. Desde este método se obtiene el tiempo de reverberación por Schröder en 5 puntos diferentes, y se calcula su media.

A continuación, se calcula un “volumen equivalente” de cada recinto. Éste es necesario, ya que para que los cálculos de niveles estadísticos sean correctos, se ha de introducir un volumen compatible con el tiempo de reverberación calculado anteriormente y la absorción de la sala mediante la fórmula de Eyring. De esta forma, aunque el recinto de mantenga abierto, el cálculo de los parámetros será correcto.

Una vez solucionado esto, se han realizado las simulaciones pertinentes. Para el cálculo del nivel de presión sonora directo se ha utilizado el método *Standard Mapping*. En cambio, el nivel de presión sonora total se ha calculado mediante *Standard Mapping with Reflections*, que proporciona una mayor precisión al realizar cálculos con reflexiones. Debido a esto las simulaciones conllevan más tiempo, por lo que sólo se han realizado tras asegurar la posición de los altavoces.

Al tratarse la estación de un área en el que se necesitará unos niveles mínimos de inteligibilidad, se ha procedido a realizar la ecualización. Dado que el cliente no ha proporcionado criterios respecto a la ecualización, se ha utilizado la curva X como referencia. Cada nivel de la estación se ha ecualizado por separado utilizando el nivel total calculado anteriormente, dando como resultado final una respuesta en frecuencia plana, con una caída de 3 dB por octava en altas frecuencias.

Tras terminar las simulaciones, se ha demostrado cómo el sistema diseñado cumple con los requisitos establecidos. El nivel de presión sonora total es más que suficiente para los niveles de ruido indicados. Los valores de STI hallados evidencian que la inteligibilidad en la estación será buena, con un nivel más que aceptable en los andenes, donde se tendrá el mayor nivel de ruido.

Con el número de altavoces necesarios, se han diseñado los bucles de altavoces. El número de amplificadores necesarios para alimentar este sistema se ha calculado utilizando el número de bucles y sumándole canales de redundancia. Además, los canales de los amplificadores se han utilizado como máximo a la mitad de su potencia, permitiendo así una posible ampliación futura sin saturar los amplificadores.

Para poder mejorar el funcionamiento del sistema PAGA se han situado micrófonos en zonas de la estación donde será necesario aumentar o disminuir la potencia de los altavoces dependiendo del nivel de ruido. Estas zonas son Concourse Level y Platform Level, donde se encontrará la mayor afluencia de viajeros, que sumado con el nivel de ruido producido por los trenes al entrar en la estación, producirán grandes variaciones de ruido de fondo.

Tras esto se ha realizado el conexionado entre los equipos, tanto de los bucles calculados anteriormente con el resto de equipos, como con un mayor nivel de detalle en el rack donde estarán situados.

Finalmente se ha calculado un presupuesto con los costes de los equipos necesarios y la mano de obra para la realización del diseño, simulaciones y documentación.

15. Referencias

- [1] Honolulu Authority for Rapid Transportation. *Honolulu Rail Transit*. [Disponible on-line en: <http://www.honolulutransit.org/>]. Consultado en marzo de 2014.
- [2] National Fire Protection Association. *NFPA 72. Código Nacional de Alarmas de Incendios*. Quincy (MA): NFPA, 1996.
- [3] The Associated General Contractors (AGC) of America. Buy America Act. [Disponible on-line en: http://www.agc.org/cs/buy_american_act]. Consultado en mayo de 2014.
- [4] Alcatel-Lucent. [Disponible on-line en: <http://www.alcatel-lucent.com/>]. Consultado en junio de 2014.
- [5] BSS Audio. [Disponible on-line en: <http://bssaudio.com/en-US>]. Consultado en mayo de 2014.
- [6] Harman. [Disponible on-line en: <http://www.harman.com/EN-US/Pages/Home.aspx>]. Consultado en mayo de 2014.
- [7] Crown Audio. [Disponible on-line en: <http://www.crownaudio.com/>]. Consultado en abril de 2014.
- [8] Penta Corporation. *Passenger Information products*. [Disponible on-line en: <http://www.penta-corp.com/>]. Consultado en abril de 2014.
- [9] Atlas Sound. [Disponible on-line en: <http://www.atlassound.com/>]. Consultado en enero de 2014.
- [10] Huahua, YU; JiaChun, LI. "Field acoustic measurement of high-speed train sound along BTIR". *Science China*. Vol 56, Nº 2, febrero 2013.
- [11] Owens Corning Insulating Systems. *Insulation specifications*. [Disponible on-line en: <http://www2.owenscorning.com/literature/pdfs/10013812.pdf>]. Consultado en mayo de 2014.

16. Bibliografía

1. Alexander, William DeWitt. *A brief History of the Hawaiian People*. Nueva York: American Book Company, 1891.
2. Honolulu Authority for Rapid Transportation. *Honolulu Rail Transit*. [Disponible on-line en: <http://www.honolulutransit.org/>]. Consultado en marzo de 2014.
3. Ahnert Feistel Media Group. *EASE 4.3 Tutorial*. [Disponible on-line en: <http://ease.afmg.eu/index.php/documents.html>]. Consultado en febrero de 2014.
4. Recuero López, Manuel. *Acústica arquitectónica aplicada*. Madrid: Ediciones Paraninfo, 1999.
5. Ortiz Berenguer, Luis Ortiz. *Refuerzo sonoro. Bases para el diseño*. Publicaciones EUITT, Madrid: 1998.
6. Sánchez Bote, José Luis. *Sistemas de refuerzo sonoro*. Madrid: Publicaciones ETSIST, 2012.
7. Sánchez Bote, José Luis. *Micrófonos*. Madrid: Publicaciones EUITT, 2002.

